

ANÁLISIS EXERGÉTICO EN PLANTAS DE TRATAMIENTO EN EL CICLO INTEGRAL DEL AGUA

Proyecto Final Master Energías Renovables y
Eficiencia Energética

Autor: Ana Isabel Lozano García

Director: Javier Uche y Amaya Martínez

Septiembre 2.011

Agradecimientos

En primer lugar mis más sinceros agradecimientos a las dos personas que han dirigido este proyecto, Javier Uche y Amaya Martínez, por el apoyo y dedicación a la hora de solucionar problemas y resolver dudas, siempre han estado cuando lo he necesitado. Igualmente quiero agradecer a Beatriz Carrasquer sus desinteresados momentos dedicados a mis múltiples preguntas. Muchas gracias.

Quiero destacar que este trabajo no habría sido posible sin la aportación de los datos de planta analizadas, y ha sido necesaria la colaboración de muchas personas responsables del ciclo integral del agua en Zaragoza. Reduciendo la lista al mínimo posible dentro del personal del Ayuntamiento de Zaragoza (Infraestructuras) quiero reconocer el apoyo de Carlos Lafuente en la recopilación de datos de la potabilizadora de Casablanca. Además, agradecer a Enric Roche y Joaquín Suescun (Utedeza) por la cesión de datos de la depuradora de La Cartuja, y Miguel Ángel López y María Ruiz (Depuración de Aguas del Mediterráneo, DAM), por la obtención de datos de la depuradora de La Almozara.

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo es la aplicación del análisis exergético a las tres plantas de tratamiento de agua situadas en Zaragoza, partiendo de datos reales. Las plantas objeto de estudio son las depuradoras de “La Almozara y “La Cartuja” y la potabilizadora de “Casablanca”. El análisis se centrará tanto en el proceso global como en las distintas etapas que se llevan a cabo dentro de las depuradoras, con especial interés en la etapa de valorización de los fangos. Dentro de las posibilidades que se tiene de valorización de fangos, la depuradora de “La Almozara” lleva a cabo la digestión anaerobia con uso posterior del biogás en cogeneración, mientras que “La Cartuja” incinera los fangos producidos en el proceso de depuración con uso posterior de los gases de combustión calientes.

Los resultados del análisis exergético constatan un mayor coste exergético de los procesos de depuración frente a la potabilización. Dentro de los procesos de depuración, la etapa de tratamiento secundario (la de eliminación de materia orgánica) supone mayor coste exergético que la de tratamiento primario, como era esperado.

La valorización energética de los fangos en las depuradoras es una cuestión crucial en el análisis de la eficiencia energética de la depuración de aguas residuales, ya que éstos presentan un gran contenido exergético como residuos en el proceso de depuración de las aguas. Estudiadas las dos formas más típicas de valorización de fangos en las depuradoras, tratadas en el presente trabajo con las dos depuradoras existentes en Zaragoza, se ha llegado a la conclusión de que el tratamiento de los mismos vía digestión anaerobia y cogeneración posterior presenta una mayor eficiencia energética que su incineración.

1. INTRODUCCIÓN.....	7
2. ESTADO DEL ARTE	9
3. METODOLOGÍA.....	10
3.1 Ambiente de referencia (RE).....	11
3.2 Exergía de los flujos de agua.....	13
3.3 Exergía de los flujos de subproductos generados en los procesos de tratamiento.....	16
3.3.1 Arenas.....	16
3.3.2 Grasas.....	17
3.3.3 Fangos	17
3.4 Exergía de los compuestos químicos.....	18
3.5 Exergía asociada a flujos de energía.	19
3.6 Exergía asociada a flujos en procesos de valorización de los fangos.....	19
3.6.1 Biogás.	19
3.6.2 Gases de combustión	21
3.6.3 Fluidos térmicos.	21
3.6.4 Combustibles líquidos.	22
3.6.5 Aire de combustión.	22
3.7 Definición del coste exergético unitario.	22
4. CASOS DE ESTUDIO	24
4.1 Potabilizadora: “Casablanca”	24
4.2 Depuradora: “La Almozara”	27
4.3 Depuradora: “La Cartuja”	33
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES	38
6. BIBLIOGRAFÍA.....	43

ANEXOS

ANEXO A. PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE CALIDAD EN LAS AGUAS.....	44
ANEXO B. PLANTAS DE TRATAMIENTO: DESCRIPCIÓN DETALLADA Y DATOS TÉCNICOS	
1. PLANTAS DE TRATAMIENTO.....	54
1.1 Plantas de depuración.....	54
1.1.1 Pretratamiento.....	54
1.1.2 Tratamiento primario.....	55
1.1.3 Tratamiento secundario.....	55
1.1.4 Tratamiento de fangos.....	55
1.1.5 Procesos de precipitación química.....	57
1.2 Plantas de potabilización.....	58
1.2.1 Desbaste o cribado.....	58
1.2.2 Coagulación.....	58
1.2.3 Floculación.....	59
1.2.4 Sedimentación.....	59
1.2.5 Filtración.....	59
1.2.6 Ablandamiento del agua.....	59
1.2.7 Desinfección.....	59
1.2.8 Tratamiento de lodos en plantas potabilizadoras.....	60
2. DEPURADORA DE “LA ALMOZARA”.....	61
2.1 Descripción detallada del proceso de depuración en “La Almozara”.....	61
2.2 Datos técnicos de la planta “La Almozara”.....	64
3. DEPURADORA DE “LA CARTUJA”.....	70
3.1 Descripción detallada del proceso de depuración en “La Cartuja”.....	70
3.2 Datos técnicos referentes a “La Cartuja”.....	72
4. PLANTA POTABILIZADORA “CASABLANCA”.....	79

4.1 Descripción detallada del proceso de potabilización en “Casablanca” 79

4.2 Datos técnicos referentes a la ETAP..... 80

ANEXO C. RESULTADOS DETALLADOS

1. Resultados detallados “Casablanca” 83

2. Resultados detallados “La Almozara” 85

3. Resultados detallados “La Cartuja” 88

1. INTRODUCCIÓN.

La exergía se define como la máxima cantidad de trabajo que un sistema puede realizar llevándolo hasta el estado de equilibrio con el medio que le rodea (estado de referencia externo) en una secuencia de procesos reversibles [1]. En definitiva es una propiedad termodinámica que indica la energía disponible, una medida la calidad de energía en los sistemas. Al contrario que ocurre durante las transformaciones de masa o energía en las cuales ambas son conservadas, la exergía es destruida en forma de irreversibilidades.

Así, el método exergético (o análisis exergético) es una técnica basada en la exergía, y por tanto es una medida de la cantidad de trabajo o calidad de diferentes formas de energía en relación con un ambiente de referencia dado. El balance exergético aplicado a un proceso o planta nos permite saber cuánta de la exergía empleada ha sido consumida por el proceso. Las pérdidas de exergía, denominadas irreversibilidades, nos indican de manera cuantitativa las ineficiencias del proceso. Estos balances son fruto de la combinación de las dos leyes principales de la Termodinámica: la Primera Ley nos dice que la energía ni se crea ni se destruye, mientras que por la Segunda Ley introduce el término de la entropía. El análisis exergético constituye de esta manera una herramienta útil en el estudio de eficiencia energética de los sistemas y procesos.

Aunque el método de análisis exergético ha estado enfocado a detectar y cuantificar posibilidades de mejoras en procesos y sistemas tanto térmicos como químicos [2], la introducción del término “Exergoecología” amplía la posibilidad de aplicar la exergía al ámbito de la ecología. La Exergoecología es la aplicación de la Segunda Ley de la Termodinámica mediante el análisis exergético en la evaluación de los recursos naturales [3]. El uso de estos recursos conlleva cambios en sus condiciones tanto químicas (composición) como físicas (temperatura, presión...). El valor termodinámico de un recurso natural caracterizado por sus propiedades específicas como situación o composición se define como la mínima cantidad de trabajo (exergía) necesario para producirlo mediante los materiales presentes en el ambiente de referencia. En consecuencia, la exergía de los recursos naturales nos da una idea de su potencial al no estar en equilibrio con el medioambiente, lo que en este caso representaría el ambiente de referencia (Dead State).

En la ilustración 1 se muestra de forma simplificada el ciclo que sigue cualquier recurso natural que sirve como un producto. La restauración de dichos recursos a su estado inicial (ambiente de referencia) requiere la introducción de una cierta cantidad de exergía lo que da lugar a un coste exergético.

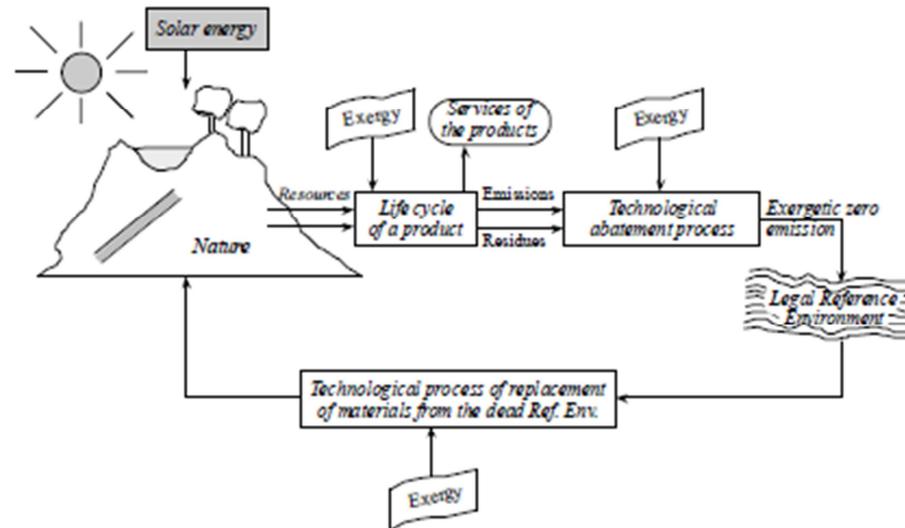


Ilustración 1. Procesos principales en la evaluación de los recursos naturales [3].

Si pensamos en los recursos hídricos mundiales como recursos naturales que tienen que responder a múltiples demandas cada vez más crecientes a medida que la población aumenta, es un hecho grave vemos que la contaminación y el uso excesivo de las aguas tanto superficiales como subterráneas provocan impactos sobre su cantidad y calidad [4]. La valoración del estado de las masas de agua en función de su cantidad y calidad energética, se puede medir mediante la metodología denominada exergoecológica, “Hidronomía Física” [5].

La Hidronomía Física compara el perfil exergético de los ríos (o masa de agua) con el perfil que tendría en las condiciones que impone la normativa medioambiental. Para poder restaurar tanto en cantidad como en calidad las aguas es necesario el uso de tecnologías, entre las que podemos destacar los tratamientos de depuración de las aguas residuales, los cuales llevan asociado el consumo de materia y energía mediante procesos tecnológicos reales y por tanto con un coste exergético (ilustración 1).

Dentro del análisis exergético del ciclo del agua (Hidronomía Física), el presente trabajo se centrará en los procesos de tratamiento de depuración de aguas residuales y tratamiento de aguas para uso humano (potabilización). Se analizarán tres plantas de tratamiento situadas en Zaragoza. Dos de ellas corresponden con plantas de tratamiento de aguas residuales, “La Cartuja” y “La Almozara”, mientras que la tercera será una planta potabilizadora de agua, “Casablanca”. El fin del análisis será la comparación de dos procesos de depuración en los cuales la valorización de los fangos se realiza por medios diferentes: digestión anaerobia e incineración. Y por otro lado, poder comparar las dos tecnologías de tratamiento de aguas más extendidas, depuración y potabilización, desde el punto de vista del análisis exergético, es decir, de la

eficiencia energética de unas plantas diseñadas para cumplir unos objetivos de eficacia en el proceso (estándares de calidad a la salida de dichas plantas).

2. ESTADO DEL ARTE

Uno de los primeros trabajos realizados con el objetivo de aplicar el análisis exergético a depuradoras de agua fue realizado por Hellström [16]. Dicho trabajo se centró en el cálculo de las exergías asociadas a las corrientes de los compuestos químicos añadidos, la materia orgánica presente en el agua y los compuestos de nitrógeno y fósforo. La aplicación del análisis exergético fue empleada más tarde por este mismo autor para comparar diferentes plantas de tratamiento de aguas con sistemas diferentes de eliminación de nutrientes [21]. Anterior a estos trabajos cabe destacar la aportación de Tai [17], que aunque no realizando un análisis exergético, estudió la relación entre la exergía química de la materia orgánica presente en el agua y los parámetros indicadores de esta.

El uso del análisis exergético para determinar el coste y eficiencia exergética en los procesos de depuración ha sido escasamente analizado en la literatura científica. No obstante, es una línea emergente y se está empleado ya recientemente por varios autores, estableciendo distintos índices o ratios exergéticos, útiles para evaluar su funcionamiento. Así podemos destacar los trabajos de Martínez y Uche [19], donde los autores llevaron a cabo un análisis de los costes exergéticos de tecnologías de desalación y depuración de las aguas diferenciando entre dos ratios, el del proceso y el de producto, con el fin de considerar el valor exergético de los subproductos generados en los procesos. Estos mismos autores junto a Carrasquer [42], enfocaron el estudio en la aplicación del análisis exergético para observar la mejora de eficiencia en la eliminación de los residuos al valorizarlos. Un planteamiento parecido realizaron Mora-Bejarano y Oliveira [33],[43] empleando los ratios exergéticos, eficiencia exergética ambiental ($\eta_{env,exerg}$) y ratio de polución ($R_{pol,t}$) como indicadores en el análisis de plantas depuradoras de agua. Reseñar también que Gallegos y Zaleta [44] desarrollaron como modelo para medir la eficiencia exergética el ratio que relaciona la variación entre la exergía en el agua de entrada y de salida con la exergía de los recursos empleados en el proceso.

De entre los trabajos científicos relacionados con la aplicación de análisis exergético en plantas de tratamiento de aguas, con el fin último de determinar el estado de las masas de aguas naturales mediante la cuantificación de su contenido exergético, caben destacar los desarrollados por Valero, Uche y Martínez [5][11], aplicados a las cuentas de la región de

Cataluña, Zaleta-Aguilar, Ranz y Valero [45] o Chen [46], el cual evaluó la exergía química en 72 ríos y 24 lagos representativos del Planeta.

3. METODOLOGÍA

Para llevar a cabo el balance exergético de las plantas de depuración de aguas residuales, dada su fisionomía se van a dividir en tres bloques:

- Tratamiento primario: donde se incluye pretratamiento y decantación primaria.
- Tratamiento secundario: incluye tanto el tratamiento biológico (lodos activos o fangos activados) como la decantación secundaria.
- Línea de fangos y valorización: tratamiento de los fangos para su reducción de humedad (espesadores de gravedad, centrífugas, digestor anaerobio...), así como la etapa de valorización de dichos fangos llevada a cabo en cada una de las depuradoras.

En el caso de la planta potabilizadora, al ser un proceso más simple y no contar con datos disgregados, se considerará un único bloque como caja negra con flujos de entrada y salida globales.

Estudiado el proceso de depuración y potabilización en las plantas de tratamiento, se han podido identificar los distintos flujos de materia y energía que toman parte en sus diferentes etapas. Estos flujos comprenden:

- Flujos de agua: agua a tratar de entrada en las plantas y agua tratada de salida de las plantas. Para el caso de las depuradoras se ha considerado un flujo de agua de salida del tratamiento primario con entrada en el secundario.
- Flujos de compuestos químicos: en las plantas de depuración de aguas residuales dos han sido los compuestos químicos empleados, cloruro férrico (Cl_3Fe) y polielectrolito. En el caso de la potabilizadora los compuestos químicos empleados son el sulfato de alúmina ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) y el hipoclorito sódico (NaClO).
- Flujos energéticos: consumos eléctricos o de calor dentro de las plantas.
- Flujos de subproductos (o residuos) generados en el proceso de tratamiento: arenas, grasas y fangos.
- Otros flujos asociados con los procesos de valorización de los fangos: biogás, combustibles fósiles (gasóleo), gases de combustión, fluidos térmicos (vapor y agua caliente) así como aire empleado en los procesos de combustión.

Para realizar el análisis exergético de las plantas de tratamiento es necesario el cálculo de la exergía contenida en cada uno de los flujos asociados con los procesos. La exergía de cualquier sustancia puede ser separada en exergía física y exergía química. La exergía física representa el trabajo que se puede obtener por llevar el sistema hasta las condiciones de temperatura y presión del ambiente de referencia manteniendo su composición constante. Por el otro lado, la exergía química representa el trabajo que se puede obtener por llevar una sustancia al equilibrio químico con el ambiente de referencia a temperatura y presión constante. Esta exergía química tiene dos contribuciones: la exergía de reacción, resultante de las reacciones necesarias para producir un compuesto a partir de las sustancias existentes en el ambiente de referencia; y la exergía de concentración, resultado de la diferencia de concentración de una sustancia con la concentración en el ambiente de referencia. Por tanto, el contenido exergético de dichos flujos depende del ambiente de referencia seleccionado.

En el presente apartado se detallará tanto la definición del ambiente de referencia establecido, como la metodología de cálculo aplicada para determinar el contenido exergético de cada uno de los flujos.

3.1 Ambiente de referencia (RE)

Como ya se ha indicado con anterioridad, la exergía de cualquier sustancia o proceso tiene que ser calculada con respecto a un ambiente de referencia.

La determinación de un ambiente de referencia en el cálculo de exergía de los recursos naturales es compleja dado que ha habido varias contribuciones por parte de diversos autores (Gaggioli and Petit[6], Sussman [7], Ahrendt [8], Van Gool [9], Szargut [10], Szargut y cols. [47]) cada una de las cuales propone un ambiente de referencia diferente. En la búsqueda del ambiente de referencia (RE) una afirmación es común, el ambiente de referencia para los recursos naturales debe estar determinado por un ambiente natural y suponer una degradación termodinámica (Dead Planet) en el cual todos los materiales han reaccionado, se han dispersado y mezclado, un estado de exergía cero.

En el caso del recurso hidrológico el ambiente natural de referencia elegido por varios autores [5] y [11] es el agua de mar. En el ciclo hidrológico el mar es la referencia natural a la cual van a parar las corrientes de los ríos, diluyéndose el agua dulce en la inmensa masa de agua salada a cierta distancia de las costas, alcanzándose de esta forma el equilibrio termodinámico y perdiendo toda posibilidad de producir trabajo (temperatura, presión, velocidad...).

El agua de mar se puede suponer compuesta por agua pura y una mezcla de materia inorgánica disuelta, esta última formada por sales disueltas. Otros posibles compuestos que están presentes en bajas concentraciones en el mar son compuestos de nitrógeno y fósforo, así como materia orgánica. Se generan con ello dos posibilidades en cuanto a la composición del ambiente de referencia adoptado: considerando la presencia de compuestos de nitrógeno, fósforo y materia orgánica; y por otro lado considerando únicamente la presencia de sales [11]. Para el caso de nuestro estudio se tomará la última opción como ambiente de referencia con el fin de remarcar la diferencia entre el agua contaminada por el uso humano (con presencia principalmente de sustancias orgánicas y en muchos casos nitratos y fosfatos) y el agua de mar, a la cual debe ser vertida con un mínimo de calidad impuesta por las directivas medioambientales.

El ambiente de referencia para el análisis realizado en este trabajo será el agua del mar Mediterráneo cuya salinidad es de 36.700 ppm, considerándose compuesto exclusivamente por agua pura e iones de cloro y sodio, ya que estos son los elementos mayoritarios (Ver tabla 1).

Tabla 1. Composición del agua de mar [12].

Element	At.weight	ppm
Hydrogen H ₂ O	1.00797	110,000
Oxygen H ₂ O	15.9994	883,000
Sodium NaCl	22.9898	10,800
Chlorine NaCl	35.453	19,400
Magnesium Mg	24.312	1,290
Sulfur S	32.064	904
Potassium K	39.102	392
Calcium Ca	40.08	411
Bromine Br	79.909	67.3

El ambiente estable de referencia para otro tipo de sustancias distintas del agua, como compuestos gaseosos, vapor, fluidos térmicos... estudiados en el presente trabajo, queda definido por:

- ✓ T_0 : temperatura del ambiente de referencia 298,15 K
- ✓ P_0 : presión del ambiente de referencia 1,01325 bar
- ✓ Composición del aire formado por O₂, N₂, CO₂ y H₂O.

Tabla 2. Composición molar del ambiente de referencia, aire [13]

Componentes	Fracciones molares
N ₂	X _{N2} =0.7898*(1-X _{H2O})
O ₂	X _{O2} =0.2099*(1-X _{H2O})
CO ₂	X _{CO2} =0.0003**(1-X _{H2O})
H ₂ O	X _{H2O} =P _{VH2O} (T ₀)/P ₀

*P_{VH2O} presión de vapor del agua en el aire a la temperatura del mismo, en este caso T₀.

3.2 Exergía de los flujos de agua.

La exergía calculada para las masas de agua estará compuesta por las dos componentes que ya se indicaron en el apartado anterior: la componente física de la exergía y la componente química. De este modo, la exergía de cualquier flujo de agua va a quedar definida por su masa y seis parámetros que miden las condiciones físicas del agua: temperatura, presión, composición, concentración, velocidad y altitud [14]. Considerándose un fluido incompresible, la exergía específica puede ser calculada mediante la siguiente expresión [11]:

$$\begin{aligned}
 \underbrace{b_{H_2O} (kJ / kg)}_{\text{Exergía .esp .total .b}} = & \underbrace{c_{p,H_2O} \left[T - T_0 - T_0 \ln \left(\frac{T}{T_0} \right) \right]}_{\text{Exergía .térmica}} + \underbrace{v_{H_2O} (p - p_0)}_{\text{Exergía .mecánica}} + \\
 & \underbrace{\left[\sum_i y_i \left(\Delta G_{f_i} + \sum_e n_e b_{ch,n_e} \right) \right]_p}_{\text{Exergía .química}} + \underbrace{RT_0 \sum_i x_i \ln \frac{a_i}{a_0}}_{\text{Exergía .concentrac ión}} + \underbrace{\frac{1}{2} \left(\frac{C^2 - C_0^2}{1000} \right)}_{\text{Exergía .cinética}} + \underbrace{g (z - z_0)}_{\text{Exergía .potencial}}
 \end{aligned}
 \tag{Ec. 1}$$

En la ecuación 1 el primer término corresponde a la componente térmica de la exergía, el segundo representa la componente mecánica, el quinto la componente potencial, mientras que el último hace referencia a la componente cinética. Todas estas componentes determinan la exergía física (b_{ph}). Los términos tercero y cuarto representan no obstante las componentes de concentración (b_{ch,c}) y formación de la exergía química (b_{ch,f}). En el presente estudio no se tendrán en cuenta las componentes físicas para el cálculo de exergía en los flujos de agua, al no ser representativo en las plantas de tratamiento de agua variaciones significativas en temperatura, presión y altura durante dichos procesos.

Los dos términos que tienen en consideración la composición del agua para el cálculo de su exergía son las componentes de concentración y la componente química de formación. De este modo, el cálculo de exergía para los flujos de agua en los procesos de tratamiento estudiados vendrá definido por:

$$b_w = b_{IM} + b_{MO} + b_{NP} + b_{are} \quad \text{Ec. 2}$$

$$b_{IM} = b_{H2O} + b_{sales} \quad \text{Ec. 3}$$

Dónde:

- ✓ b_{IM} representa la exergía de la materia inorgánica compuesta por el agua pura y la contribución de las sales disueltas, calculada como exergía de concentración al considerarse sustancias presentes en el ambiente de referencia.
- ✓ b_{MO} y b_{NP} representa la exergía química de la materia orgánica y los compuestos de nitrógeno y fósforo presentes en el agua, ambos calculados como exergía química de formación al no considerarse presentes en el ambiente de referencia.
- ✓ b_{are} es la exergía química de las arenas, explicada más adelante en detalle en el apartado correspondiente a los flujos exergéticos de los residuos.

Tanto para el cálculo de la exergía del agua pura (b_{H2O}) como de las sales, la expresión empleada es la de concentración (Ec.4), en la que x_i hace referencia a la concentración molar de cada elemento en la mezcla, a_i representa la actividad de la especie en la mezcla y a_0 la actividad de la especie en el ambiente de referencia.

$$b_{ch,c} = RT_0 \sum_i x_i \ln \left(\frac{a_i}{a_0} \right) \quad \text{Ec. 4}$$

El cálculo de las actividades de las sales disueltas en el agua se lleva a cabo mediante las siguientes expresiones recogidas en [15]:

$$a_i = \gamma_i m_i \quad \text{Ec. 5}$$

$$\ln \gamma_i = \frac{-A z_i^2 \sqrt{I}}{1+B \phi_i \sqrt{I}} \quad \text{Ec. 6}$$

$$I = \frac{1}{2} \sum_i m_i z_i^2 \quad \text{Ec. 7}$$

Donde γ representa el coeficiente de actividad, m la molalidad de cada sustancia, z es la valencia del ión, ϕ_i es el diámetro efectivo del ión, I es la fuerza iónica del electrolito, siendo A y B dos constantes cuyos valores son $0.51 \text{ kg}^{1/2} \text{ mol}^{1/2}$ y $3.287 \times 10^9 \text{ kg}^{1/2} \text{ m}^{-1} \text{ mol}^{-1/2}$ para el agua a 25°C , respectivamente [15].

La molalidad (moles de soluto por kilogramo de agua) de cada especie disuelta en el agua se puede obtener a partir de la salinidad del agua aplicando la siguiente expresión [31]:

$$m_i = w_i \left(\frac{1}{PM_i} \right) \left(\frac{1000}{\frac{1-C}{1000}} \right) \text{ Ec. 8}$$

Donde w_i es la fracción másica del compuesto en la disolución, PM_i es el peso molecular del compuesto i , y C representa la salinidad.

Con la aplicación de la ecuación 8 al ambiente de referencia definido en la sección 3.1, cuya salinidad es de 36.700 ppm, podemos obtener las actividades de referencia para los iones cloro y sodio sabiendo que su valencia es 1 y el diámetro efectivo del ión es 3.10^{-10} y $4,5.10^{-10}$ m, respectivamente:

$$a_{rCl} = 0.3845$$

$$a_{rNa} = 0.4232$$

En el caso del agua pura el cálculo de la actividad se realiza considerando que el agua pura es un componente de la mezcla, de forma que la expresión empleada es:

$$a_{agua} = 1 - 0.017m_{tot} \text{ Ec. 9}$$

Donde m_{tot} representa la molalidad de los solutos (en nuestro caso Na y Cl). Obteniéndose una actividad para el agua pura de:

$$a_{rH_2O} = 0.9778$$

La exergía de la materia orgánica presente en el agua, al no considerarse presente en el ambiente de referencia se tendría que calcular empleando la ecuación 12 correspondiente a la exergía de formación de un compuesto a partir de los elementos que lo componen. No obstante para el caso de la materia orgánica el cálculo de este modo se complica siendo necesario otro método para poder realizarlo. En este sentido un estudio llevado a cabo por Tai [17] representando la materia orgánica como $C_aH_bO_c$, donde a , b y c son la cantidad de átomos de carbono, hidrógeno y oxígeno en la molécula, respectivamente, obtuvo relaciones entre los parámetros medidos para determinar la materia orgánica en las aguas (DBO, DQO, TOC, ver anexo A para sus definiciones) y su exergía química, de modo que:

$$b_{mo} \text{ (J/l)} = 13.6 \times \text{TOD (mg/l)} \text{ Ec. 10}$$

$$b_{mo} \text{ (J/l)} = 45 \times \text{TOC (mg/l)} \text{ Ec. 11}$$

La ecuación 10 puede ser utilizada indistintamente con el TOC o con el COD, debido a la poca diferencia en los resultados obtenidos al aplicar una u otra [18].

En el caso de los compuestos de nitrógeno y fósforo la aplicación de la ecuación 12 nos daría la exergía de formación a partir de las exergías estándar de los elementos que dan lugar al compuesto.

$$\mathbf{b}_{ch,f} = \sum_i y_i (\Delta G_{fi} + \sum_e n_e \mathbf{b}_{ch,ne}) \text{ Ec. 12}$$

Tomando la afirmación de Hällstrom de que todo el nitrógeno se puede considerar como amonio (NH_4^+) y el fósforo como fosfatos (PO_4^{3-}) [16], las exergía específicas de formación para cada uno de estos compuestos de acuerdo con Szargut [15] es, $b_{ch,N}$ (kJ/mol)=322.1 y $b_{ch,P}$ (kJ/mol)=204,4.

3.3 Exergía de los flujos de subproductos generados en los procesos de tratamiento.

Al tratar las aguas en las estaciones de tratamiento su contenido exergético disminuye. Gran parte de la exergía contenida en el agua a la entrada de la planta se debe a su carga orgánica e inorgánica, parte de las cuales son retiradas en forma de residuos. Los residuos que se van a considerar en el estudio son las arenas, fangos y grasas.

3.3.1 Arenas

Las arenas retiradas durante el proceso de depuración de las aguas residuales provienen de la sedimentación de parte de la materia en suspensión contenida en el agua residual (sólidos en suspensión). Para poder evaluar en el análisis exergético se consideran las arenas como sílice (SiO_2) [19]. Dado que la sílice es un compuesto muy minoritario en la composición de las aguas de mar (0,447 ppm), no se ha considerado este como elemento presente en el ambiente de referencia, realizándose los cálculos a partir de la exergía química de formación de la sílice.

El valor de exergía química estándar para el caso de la molécula de SiO_2 se ha consultado en diferentes fuentes, considerándose como cuarzo, ya que existen otras formas de este compuesto en la naturaleza (cristobalita, amorfo). Dependiendo de la fuente consultada, el valor dado difiere desde 2,2 kJ/mol [15] hasta 0,82 kJ/mol [20]. Para la realización de los cálculos, con lo que la exergía química estándar será, $b_{ch,arena}$ (kJ/mol)=0.82, según la coherencia del análisis de los resultados obtenido con diferentes valores.

3.3.2 Grasas

Los ácidos grasos que se encuentran en estado sólido se denominan grasas. Las grasas presentes en las aguas residuales urbanas proviene principalmente de las grasas animales, aceites y ceras. La molécula que representa a la mayoría de los ácidos grasos presentes en la naturaleza es $C_{18}H_{32}O_2$, la cual tiene un peso molecular de 282 g/mol y un poder calorífico de 38,874 kJ/kg [19].

Al ser las grasas un compuesto constituido por carbono, hidrógeno y oxígeno se pueden considerar combustibles sólidos. Según Kotas [2], la exergía química de los combustibles sólidos y líquidos se puede calcular asumiendo un ratio (o coeficiente) entre el valor de exergía química contenida y su poder calorífico inferior:

$$\varphi = \frac{b_{ch}^0}{PCI} \quad \text{Ec. 13}$$

Este coeficiente puede ser calculado a partir del análisis elemental en base seca y fracciones másicas empleando la siguiente expresión:

$$\varphi = 1.0437 + 0.1882 \frac{h}{c} + 0.0610 \frac{o}{c} + 0.0404 \frac{n}{c} \quad \text{Ec. 14}$$

Donde para el caso de las grasa los valores de hidrógeno, carbono, nitrógeno y oxígeno serán 0,113, 0,766, 0 y 0,113, respectivamente.

3.3.3 Fangos

El caso de los fangos es similar a las grasas, ya que estos están compuestos por carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno. Al igual que con las grasas, el valor de exergía química contenida en la materia seca de estos se podrá obtener a partir de las ecuaciones 13 y 14 una vez conocido su poder calorífico inferior en base seca y su análisis elemental.

La composición de los fangos es muy variable tanto entre fangos procedentes del tratamiento primario y tratamiento secundario, como dependiendo de la depuradora en cuestión y la composición del agua residual. En el caso de estudio que se expondrán en el siguiente apartado, se indicará si los datos empleados han sido obtenidos de datos reales aportados por la planta o por el contrario se ha tenido que utilizar datos procedentes de bibliografía para el cálculo a falta de los anteriores.

Para el caso de los fangos procedentes de la planta potabilizadora, el cálculo de su exergía es diferentes, ya que la composición de estos fangos (ver Anexo B, apartado 1.2) están

formada principalmente por las arenas y el precipitado del coagulante, siendo la cantidad de materia orgánica que presentan menor.

$$b_{fangopotab.} = b_{are,rec} + b_{pp.} + b_{mo,rec} \quad \text{Ec. 15}$$

Donde $b_{are,rec}$ representa la exergía de las arenas recuperadas (calculadas a partir del parámetro de turbidez como medida de los sólidos en suspensión), $b_{mo,rec}$ representa la materia orgánica que ha sido retirada del agua, $b_{pp.}$ corresponde a la exergía del $\text{Al(OH)}_{3(pp)}$ procedentes de la reacción del sulfato de alúmina.

3.4 Exergía de los compuestos químicos.

En las plantas de tratamiento de aguas residuales los principales compuestos químicos empleados durante el proceso de depuración son el cloruro férrico (Cl_3Fe) y el polielectrolito. Para el caso de la planta de potabilización los compuestos empleados son el sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) y el hipoclorito sódico (NaClO).

Las exergías químicas estándar para cada uno de estos elementos se pueden consultar en tablas, cuyo valor se han obtenido aplicando un balance exergético a la reacción de formación del compuesto a partir de sus elementos.

$$b_{ch}^0 = \Delta G_f^0 + \sum_{el} n_{el} b_{chel}^0 \quad \text{Ec. 16}$$

En el caso del polielectrolito (o polímero) no se conoce la composición exacta del mismo, por lo que se ha tomado un valor de referencia usado por Hällstrom en el análisis exergético de depuradoras de agua [21].

Tabla 3. Exergía química estándar compuestos químicos.

CQ	b_{ch}^0 (kJ/mol)
Cl_3Fe	228,1 [15]
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	344,3 [15]
NaClO	170,17
Polímero	15,2* [21]

*Dato aportado en kJ/kg

3.5 Exergía asociada a flujos de energía.

Dentro de flujos de energía se consideran los procesos de transferencia de trabajo (electricidad) y calor. El contenido exergético para estos flujos tomando la notación de Kotas [2] es:

- ✓ Flujos de trabajo: su contenido energético es igual a su contenido en exergía.
- ✓ Flujos de calor:

$$b_Q = Q \cdot \eta \quad \text{Ec.17}$$

$$\eta = 1 - \frac{T_0}{T} \quad \text{Ec. 18}$$

Donde Q representa el valor energético de la corriente de calor y T temperatura a la cual tiene lugar el proceso de transferencia de calor.

3.6 Exergía asociada a flujos en procesos de valorización de los fangos.

3.6.1 Biogás.

Mediante el proceso de digestión anaerobia de los fangos procedentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales se obtiene un gas con un alto contenido de metano (60-80%) denominado biogás, el cual puede ser empleado como combustible.

La obtención de la exergía asociada a la corriente de biogás viene dada por la suma de las componentes térmica, mecánica y química, suponiendo el combustible gaseoso como una mezcla ideal de gases. Con estas suposiciones se ha aplicado la metodología desarrollada por M.A Lozano y A. Valero en [13]:

$$b_{biogas} = \sum x_j (b_{jT} + b_{jP} + b_{jQ}) \quad \text{Ec. 19}$$

Donde b_{jT} representa la componente térmica, b_{jP} representa la componente mecánica y b_{jQ} la química. Para el caso de la componente térmica, se calculará el calor específico a presión constante de los gases como una ecuación en función de los coeficientes A, B, C y D diferentes para cada una de las sustancias presentes en el biogás, quedando por tanto una expresión de exergía térmica específica para cada una de las sustancias presentes en la mezcla como:

$$b_{jT} \left(\frac{cal}{mol} \right) = (A - T_0 B)(T - T_0) + \frac{1}{2}(B - T_0 C)(T^2 - T_0^2) + \frac{1}{3}(C - T_0 D)(T^3 - T_0^3) + \frac{1}{4}D(T^4 - T_0^4) - AT_0 \ln \frac{T}{T_0} \quad \text{Ec.}$$

La componente mecánica se obtiene de a partir de la temperatura y presión del ambiente de referencia, la presión a la que se encuentra el biogás y la constante R cuyo valor es 1,98717 cal/mol K:

$$b_{jP} \left(\frac{\text{cal}}{\text{mol}} \right) = RT_0 \ln \frac{P}{P_0} \quad \text{Ec. 21}$$

En el caso de la componente química de la exergía se distinguen las sustancias presentes en el biogás como elementos presentes en el ambiente de referencia o los que no lo están, siendo el método aplicada para cada caso diferente:

- ✓ Presentes en el ambiente de referencia (exergía de concentración):

$$b_{jQ} = RT_0 \ln \frac{x_i}{x_i^0} \quad \text{Ec. 22}$$

Donde x_i hace referencia a la fracción molar de la sustancia en la mezcla y x_i^0 representa la concentración molar de esa misma sustancia en el ambiente de referencia.

- ✓ No presentes en el ambiente de referencia (exergía química de formación):

$$b_{jQ} = - \left[\Delta H_R^0 - T_0 \Delta S_R^0 + \Delta C_{PR}^0 (T_0 - T^0) - \Delta C_{PR}^0 T_0 \ln \frac{T_0}{T^0} \right] + RT_0 \ln \frac{(x_{O_2,0} P_0)^{r_{O_2}}}{(x_{O_2,0} P_0)^{p_{CO_2}} (x_{N_2,0} P_0)^{p_{N_2}}} + RT_0 \ln(x_j P_0) \quad \text{Ec. 23}$$

Tabla 4. Datos de reacciones de equilibrio con el ambiente de referencia (Adaptado de [13])

i	ACr _i	AHr _i	ASr _i
	cal/mol K	cal/mol	cal/mol K
CH ₄	22,32	-212.797	-58
H ₂ S	-6,42	-215.530	-88,65
H ₂	7,6	-68.317	-38,99
CO	-1,6	-67.636	-20,74

Tabla 5. Datos para los calores específicos a presión constante en gases ideales (Adaptado de [13])

i	A _i	B _i	D _i	C _i
CH ₄	4,75	1,20E-02	-2,63E-09	3,03E-06
H ₂ S	7,07	3,13E-03	-7,87E-10	1,36E-06
H ₂	6,952	-4,58E-04	-2,08E-10	9,56E-07
CO	6,726	4,00E-04	-5,31E-10	1,28E-06
N ₂	6,903	-3,75E-04	-6,86E-10	1,93E-06
O ₂	6,085	3,63E-03	3,13E-10	-1,71E-06
CO ₂	5,316	1,43E-02	1,78E-09	-8,36E-06

* C_p (cal/mol K)= $A+BT+CT^2+DT^3$; T(K)

3.6.2 Gases de combustión

Los flujos de gases de combustión para los cuales se ha de calcular su contenido exergético son los generados en el proceso de incineración y combustión en el motor alternativo de combustión interna. Para el cálculo se supondrá una mezcla de gases ideales aplicándose una metodología similar a la descrita para el caso del biogás.

$$b_{gases} = b_{phT} + b_{phP} + b_{ch} \quad \text{Ec. 24}$$

Para el caso de los gases el calor específico a presión constante se ha obtenido a partir de los calores específico de cada componente en la mezcla, quedando la componente de exergía térmica:

$$b_{phT} \left(\frac{kJ}{kg} \right) = c_p \left(T - T_0 - T_0 \ln \frac{T}{T_0} \right) \quad \text{Ec. 25}$$

Será necesario conocer la composición de dichos gases en fracciones molares de cada una de las sustancias que los componen en la mezcla, dicho cálculo se realizará a partir de la composición del combustible empleado (en nuestro caso de estudio fangos deshidratados y biogás), suponiendo un exceso de aire según la tecnología de combustión y un proceso de combustión completa.

3.6.3 Fluidos térmicos.

El vapor de agua y agua en estado líquido son los dos fluidos térmicos que se emplean en los procesos de valorización de fangos. Estos fluidos son utilizados en el ciclo de Rankine con turbina de gas, así como en los motores de combustión interna para refrigeración y posterior calentamiento del digestor anaerobio. Tanto el ciclo de Rankine como los circuitos de refrigeración de las camisas del MACI son circuitos cerrados, por lo que para el cálculo de exergía bastará con determinar la componente física de esta:

$$b = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad \text{Ec. 26}$$

Donde h y s representan la entalpía y entropía del fluido a la temperatura y presión de trabajo, h_0 , s_0 y T_0 corresponden con los valores de entalpía, entropía y temperatura para el ambiente de referencia.

3.6.4 Combustibles líquidos.

Uno de los combustibles líquidos empleados en la depuradora de "La Cartuja" es el gasoil. El cálculo de su exergía química se ha realizado mediante la expresión propuesta por Kotas [2] para la obtención del coeficiente ϕ , que relaciona el poder calorífico inferior del combustible y su exergía, tal y como ocurría para el caso de los fangos.

$$\phi = 1,04010 + 0,1728 \frac{h}{c} + 0,0432 \frac{o}{c} + 0,2169 \frac{s}{c} \left(1 - 2,0628 \frac{h}{c}\right) \quad \text{Ec. 27}$$

Donde h , c , s y o representan las fracciones másicas en bases seca de cada uno de estos elementos en el combustible.

$$b_{ch,gasoil}^0 = \phi \cdot PCI_{gasoil} \quad \text{Ec. 28}$$

3.6.5 Aire de combustión.

El aire empleado en los procesos de combustión no presentará exergía química ya que su composición es igual al ambiente de referencia. La exergía que pueda tener el aire provendrá de la componente térmica y mecánica. De este modo su exergía específica, considerando un gas ideal, viene determinada por la siguiente ecuación:

$$b_{aire} = c_{p,aire} \cdot (T_{s,aire} - T_0 - T_0 \ln \left(\frac{T_{s,aire}}{T_0}\right)) + R_a T_0 \ln \left(\frac{P_{aire}}{P_0}\right) \quad \text{Ec. 29}$$

Donde $c_{p,aire}$ corresponde con el calor específico a presión constante del aire y $T_{s,aire}$ y P_{aire} con la presión y temperatura a la cual se encuentra el aire.

3.7 Definición de índices exergéticos.

La eficiencia exergética es definida según Valero y cols. [32] como la proporción del valor exergético de los productos (P) en relación con la exergía contenida en el fuel (F). La diferencia entre la exergía del fuel y del producto determina las pérdidas energéticas en el sistema.

Exergía de entrada (B_{input})-Exergía de salida ($B_{outputs}$)=Irreversibilidades >0

$$\eta = \frac{P}{F} \quad \text{Ec. 30}$$

En este sentido el coste exergético unitario (K) es definido como la inversa de la eficiencia exergética:

$$k = \frac{F}{P} \quad \text{Ec. 31}$$

En el caso de los procesos de tratamiento de aguas el producto está definido como la exergía en el estado hasta el cual quieres depurar la corriente de agua, bien por imposición de la directiva medioambiental o capacidad de depuración de la tecnología que se está empleando. Estos procesos de tratamiento de las aguas, vistos desde un punto de vista termodinámico, están considerados como anti-exergéticos, ya que se produce una disminución de exergía entre el estado inicial de entrada y final de salida, dándose lugar a un residuo con un alto contenido exergético.

Se pueden definir varios índices exergéticos dentro del análisis de los procesos de depuración, en el presente estudio los índices que se estudiarán son:

- ✓ Coste exergético unitario del producto, considerándose como Fuel (F) todos los input en el proceso: agua sin depurar y exergía añadida para poder llevar a cabo el proceso de depuración (compuestos químicos, energía eléctrica, calor...); y como Producto (P) la exergía del agua tras su proceso de tratamiento.

$$k_{prod} = \frac{F}{P} \quad \text{Ec. 32}$$

- ✓ Coste exergético unitario del proceso, considerándose el mismo Fuel que en el caso anterior, pero en este caso dentro de Producto se considera tanto la exergía del agua tras el proceso de tratamiento (P), como los residuos (R) valorizables obtenidos.

$$k_{proc} = \frac{F}{P+R} \quad \text{Ec. 33}$$

- ✓ Índice de eliminación de residuos, definido como el cociente entre la exergía contenida en los residuos y la exergía del agua de entrada más las exergías añadidas necesarias para llevar a cabo el proceso (electricidad, compuestos químicos...), representada como F.

$$\eta_{elim,res} = \frac{R}{F} \quad \text{Ec. 34}$$

En la etapa de tratamiento y valorización de los fangos, el producto será el flujo que está siendo valorizado, mientras que los residuos estarán comprendidos por aquellos flujos que no siendo empleados para la valorización energética tienen contenido exergético.

4. CASOS DE ESTUDIO

La metodología descrita en el apartado anterior se va a aplicar en el análisis de tres plantas de tratamiento reales situadas en la ciudad de Zaragoza. La descripción detallada y datos técnicos para cada una de ellas pueden ser consultados en el Anexo B. Una vez estudiadas cada una de ellas se han identificado los distintos flujos que conforman el Fuel y Producto de los procesos. A continuación se presentarán los resultados anuales del análisis exergético, pudiéndose consultar los resultados más detallados en el Anexo C.

4.1 Potabilizadora: “Casablanca”

En la potabilizadora de “Casablanca” el Fuel del proceso será la suma de las exergías de las corrientes de entrada, en este caso exergía del agua a tratar junto con la exergía necesaria para llevar a cabo el proceso de potabilización, es decir, electricidad consumida y reactivos químicos añadidos. Por otro lado el Producto será la exergía contenida en el agua tratada y cuando se hable de proceso, se tendrán que considerar los residuos: fangos y agua perdida.

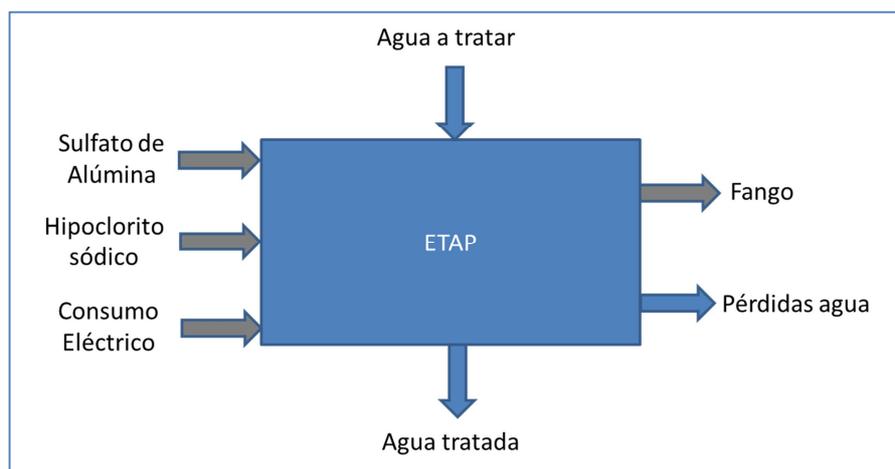


Ilustración 2. Esquema input-output para balance exergético en ETAP.

La exergía específica del flujo de agua será:

$$b_w \text{ (kJ/kg agua)} = (b_{IM} + b_{mo} + b_{are}) \quad \text{Ec. 35}$$

El cálculo del término b_{IM} relativo a la exergía química de materia inorgánica, compuesta por el agua pura y las sales disueltas, se realiza a partir de la salinidad del agua a la entrada de la planta (C) y las actividades de cada una de las sustancias en el ambiente de referencia. Por otro lado el término b_{mo} relativo a la materia orgánica, se puede calcular a partir del parámetro que define, en el caso de la potabilizadora, el contenido de materia orgánica en el agua de entrada, carbono orgánico total (TOC, más apropiado para aguas superficiales) aplicando la ecuación 11.

La exergía específica de la arena contenida en el agua se obtendrá a partir del parámetro que en este caso define el contenido de materia en suspensión, la turbidez. La concentración de arena (x_{are}) medida en mg/l se puede obtener a partir del dato de turbidez en NTU sabiendo que 1 NTU es igual a 0,13 mg/l de SiO_2 .

$$b_{are} \left(\frac{kJ}{kg \text{ agua}} \right) = \frac{b_{ch, SiO_2}^0 x_{are,e}}{PM_{SiO_2} \rho} = \frac{0,82 \left(\frac{kJ}{mol} \right) x_{are} \left(\frac{mg}{l} \right)}{60,09 \frac{g}{mol} \rho_w \left(\frac{kg}{m^3} \right)} \quad \text{Ec. 36}$$

La exergía específica de los compuestos químicos con respecto al agua de entrada se puede calcular a partir de la cantidad de compuesto añadido por m^3 de agua y la densidad del agua, tal y como se muestra en las siguientes ecuaciones:

$$b_{Al_2(SO_4)_3} \left(\frac{kJ}{kg \text{ agua}} \right) = \frac{b_{ch, Al_2(SO_4)_3}^0 \left(\frac{kJ}{mol} \right) \cdot 1000 \cdot \frac{kg \text{ } Al_2(SO_4)_3}{Q_e(m^3)}}{PM_{Al_2(SO_4)_3} \left(\frac{g}{mol} \right) \cdot \rho_w \left(\frac{kg}{m^3} \right)} \quad \text{Ec. 37}$$

$$b_{NaClO} \left(\frac{kJ}{kg \text{ agua}} \right) = \frac{b_{ch, NaClO}^0 \left(\frac{kJ}{mol} \right) \cdot 1000 \cdot \frac{kg \text{ } NaClO}{Q_e(m^3)}}{PM_{NaClO} \left(\frac{g}{mol} \right) \cdot \rho_w \left(\frac{kg}{m^3} \right)} \quad \text{Ec. 38}$$

En el caso del agua perdida, su exergía total se determina a partir de la exergía específica del agua de salida y el caudal perdido en el proceso de tratamiento (diferencia entre el agua que entra y la que sale, proporcionados por los balances de materia mensuales que maneja el Ayto. de Zaragoza).

Conocida la exergía específica de los flujos se puede obtener la exergía absoluta sabiendo el caudal de agua y su densidad:

$$B(kJ) = Q(m^3/s) \cdot b(kJ/kg) \cdot \rho_w(kg/m^3) \quad \text{Ec. 39}$$

En los fangos su exergía vendrá determinada por la exergía química contenida en las arenas recuperadas ($x_{are,e} - x_{are,s} = x_{are,rec}$), en la materia orgánica retirada ($TOC_e - TOC_s$) y el precipitado formado por la adición de sulfato de aluminio. La cantidad de precipitado formado, $Al(OH)_3$, se obtiene multiplicando 0,26 por la cantidad total de sulfato de alúmina añadido (Ver

apartado 4 anexo B), siendo su exergía estándar de 17,81 kJ/mol [20] y su peso molecular 78,01 g/mol.

$$b_{fango,potab.} = b_{are,rec}(1) + b_{pp.}(2) + b_{mo,rec}(3)$$

$$b_{pp.} \left(\frac{kJ}{kg\ pp.} \right) = \frac{17,81 \left(\frac{kJ}{mol} \right) \cdot 1000}{78,01 \left(\frac{g}{mol} \right)}$$

$$B_{fango,potab.}(kJ) = \underbrace{b_{pp.} \left(\frac{kJ}{kg} \right) \cdot kg\ Al(OH)_3}_{(2)} + \underbrace{\frac{0,82 \left(\frac{kJ}{mol} \right) \cdot x_{are,rec} \left(\frac{mg}{l} \right)}{60,09 \frac{g}{mol}} \cdot Q_s(m^3)}_{(1)} + \underbrace{\left(b_{mo,e} \left(\frac{kJ}{kg} \right) - b_{mo,s} \left(\frac{kJ}{kg} \right) \right) \cdot \rho \left(\frac{kg}{m^3} \right) \cdot Q_s(m^3)}_{(3)} \quad Ec. 40$$

Los resultados anuales para el 2.009, 2.010 (solo se han dispuesto de datos para los meses de Enero a Mayo) y 2.008 se muestran en la tabla 6.

Tabla 6. Exergía total entradas-salidas potabilizadora.

Año	Exergías de entrada a planta (Fuel)				Exergías de salida		
	B _{w,e} kJ	B _{NaClO} kJ	B _{Al2(SO4)3} kJ	B _{EC} kJ	B _{w,s} kJ	B _{w,p} kJ	B _{fango} kJ
2009	1,75E+11	3,60E+09	4,07E+09	2,11E+10	1,63E+11	6,24E+08	1,17E+10
2010	7,36E+10	8,82E+08	1,64E+09	8,52E+09	6,80E+10	2,19E+08	5,46E+09
2008	1,61E+11	3,95E+09	6,41E+09	1,95E+10	1,49E+11	7,10E+08	1,16E+10

Conocida la exergía de cada flujo se han obtenido los valores para los diferentes índices exergéticos:

$$k_{proc} = \frac{B_{w,e} + B_{Al2(SO4)3} + B_{NaClO} + B_{EC}}{B_{w,s} + B_{w,p} + B_{fango}} \quad Ec. 41$$

$$k_{prod} = \frac{B_{w,e} + B_{Al2(SO4)3} + B_{NaClO} + B_{EC}}{B_{w,s}} \quad Ec. 42$$

$$\eta_{proc} = 1/k_{proc} \quad Ec. 43$$

$$\eta_{prod} = 1/k_{prod} \quad Ec. 44$$

$$\eta_{elim,res} = \frac{B_{fango}}{B_{EC} + B_{Al2(SO4)3} + B_{NaClO}} \quad Ec. 45$$

En la Tabla 7 se pueden observar los valores de coste exergético y eficiencia tanto para el proceso como el producto en la planta potabilizadora. En el caso de la eficiencia de eliminación de residuos, los resultados están entre el 5-7%.

Tabla 7. Índices exergéticos planta Potabilizadora.

Mes	K_{prod}	η_{prod}	K_{proc}	η_{proc}	$\eta_{elim,res}$
2.009	1,251	0,80	1,163	0,86	0,06
2.008	1,280	0,78	1,182	0,84	0,06
2.010	1,245	0,81	1,149	0,87	0,06

4.2 Depuradora: “La Almozara”

El análisis exergético a la depuradora de “La Almozara” se ha realizado considerando varias etapas dentro del proceso de depuración: tratamiento primario y tratamiento secundario, lo que correspondería con la línea de aguas; tratamiento de los fangos, el cual engloba las etapas de espesado, digestión anaerobia y deshidratación hasta obtener un fango deshidratado con posibilidad de uso agrícola; y por último la etapa de aprovechamiento del biogás generado en el proceso de digestión anaerobia mediante cogeneración con motor de combustión interna (MACI). En la Ilustración 3 e Ilustración 4 se puede observar el esquema general de cada una de las etapas con los flujos de entrada y salida considerados para cada una de ellas después de estudiar el proceso de depuración de la planta.

La exergía específica de los flujos de agua a la entrada ($b_{w,e}$), salida del primario ($b_{w,1}$) y salida de depuradora ($b_{w,s}$) se determinan mediante:

$$b_w = b_{IM} + b_{MO} + b_{NP} + b_{are}$$

En este caso la exergía específica de la materia orgánica (b_{MO}) será obtenida a partir de la DQO, la exergía específica del nitrógeno (b_N) y fósforo (b_P) mediante la medida del nitrógeno de Kjeldahl y el fósforo total, en el caso de la exergía específica de las arenas (b_{are}) la concentración de estas es igual a los sólidos en suspensión (SS) en mg/l.

$$b_{MO} \left(\frac{kJ}{kg \text{ agua}} \right) = \frac{13,6 \left(\frac{J}{mg} \right) \cdot DQO \left(\frac{mg}{l} \right)}{\rho_w \left(\frac{kg}{m^3} \right)} \quad \text{Ec. 46}$$

$$b_P \left(\frac{kJ}{kg \text{ agua}} \right) = \frac{b_{ch,PO4}^0 \left(\frac{kJ}{mol} \right) \cdot P \left(\frac{mg}{l} \right)}{PM_{PO4} \left(\frac{g}{mol} \right) \cdot \rho_w \left(\frac{kg}{m^3} \right)} \quad \text{Ec. 47}$$

$$b_N \left(\frac{kJ}{kg \text{ agua}} \right) = \frac{b_{ch,NH4}^0 \left(\frac{kJ}{mol} \right) \cdot NTK \left(\frac{mg}{l} \right)}{PM_{NH4} \left(\frac{g}{mol} \right) \cdot \rho_w \left(\frac{kg}{m^3} \right)} \quad \text{Ec. 48}$$

$$b_{are} \left(\frac{kJ}{kg \text{ agua}} \right) = \frac{b_{ch,SiO2}^0 \left(\frac{kJ}{mol} \right) \cdot SS \left(\frac{mg}{l} \right)}{PM_{SiO2} \left(\frac{g}{mol} \right) \cdot \rho_w \left(\frac{kg}{m^3} \right)} \quad \text{Ec. 49}$$

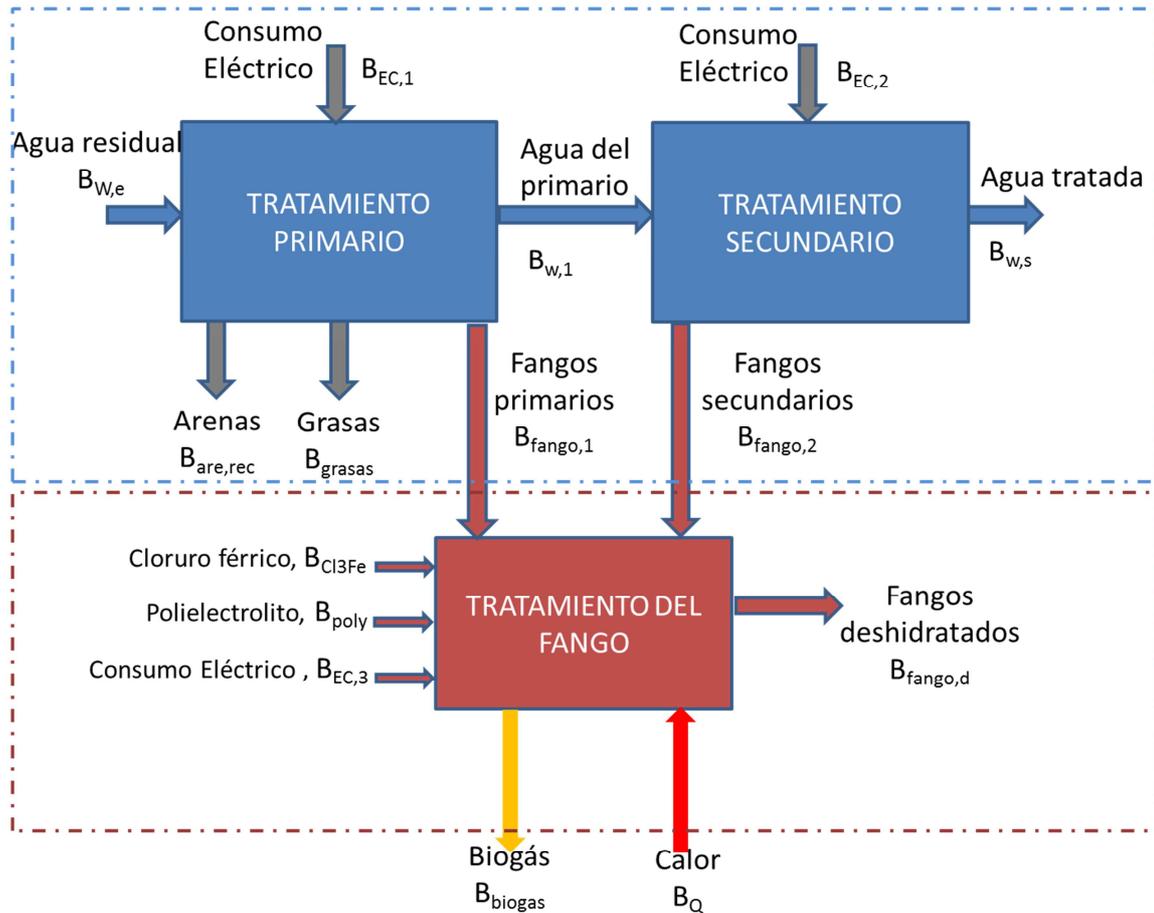


Ilustración 3. Esquema input-output para balance exergético en línea de aguas y tratamiento de fangos en "La Almozara".

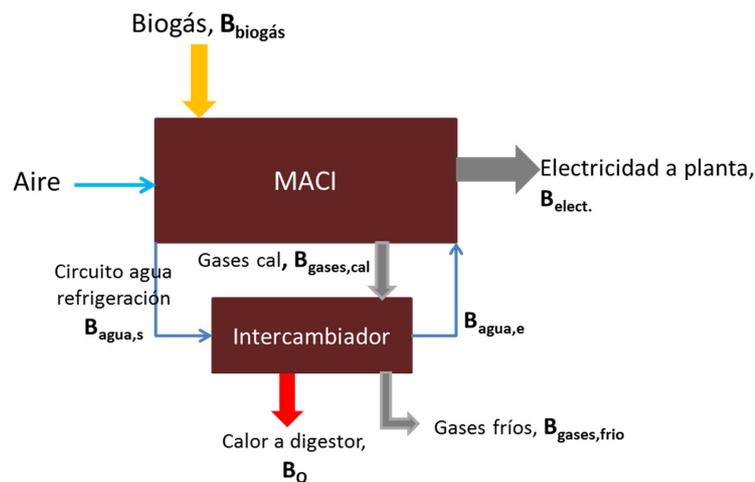


Ilustración 4. Esquema input-output para balance exergético en cogeneración de "La Almozara".

La exergía específica de las arenas recuperadas ($b_{are,rec}$) como subproducto se obtiene aplicando la ecuación 36, donde en este caso la concentración, $x_{are,rec}$, será determinada a partir de la masa de arenas recuperadas en el pretratamiento (arenas):

$$x_{are,rec} \left(\frac{mg}{l} \right) = \frac{Arenas \left(\frac{kg}{mes} \right) \cdot 1000}{Q \left(\frac{m^3}{mes} \right)} \quad \text{Ec. 50}$$

La exergía específica de las grasas se determina mediante el procedimiento descrito en el apartado 3.3.2, aplicando la siguiente expresión:

$$b_{grasa} \left(\frac{kJ}{kg \text{ agua}} \right) = \varphi \cdot 38,874 \left(\frac{kJ}{kg} \right) \cdot \frac{Grasas \left(\frac{kg}{mes} \right)}{Q \left(\frac{m^3}{mes} \right) \cdot \rho_w \left(\frac{kg}{m^3} \right)} \quad \text{Ec. 51}$$

En el caso de los fangos, los cálculos se han realizado para fangos primarios, secundarios y digeridos, siendo la exergía específica de los fangos primarios (b_{fango1}), fangos biológicos (b_{fango2}) y fangos digeridos y deshidratados ($b_{fango,d}$), las siguientes:

$$b_{fango1} \left(\frac{kJ}{kg \text{ agua}} \right) = \varphi \cdot 2.230 \left(\frac{kcal}{kg} \right) \cdot 4,187 \left(\frac{kJ}{kcal} \right) \cdot \frac{F.primario \left(\frac{kg}{mes} \right)}{Q \left(\frac{m^3}{mes} \right) \cdot \rho_w \left(\frac{kg}{m^3} \right)} \quad \text{Ec. 52}$$

$$b_{fango2} \left(\frac{kJ}{kg \text{ agua}} \right) = \varphi \cdot 3.966 \left(\frac{kcal}{kg} \right) \cdot 4,187 \left(\frac{kJ}{kcal} \right) \cdot \frac{F.biologico \left(\frac{kg}{mes} \right)}{Q \left(\frac{m^3}{mes} \right) \cdot \rho_w \left(\frac{kg}{m^3} \right)} \quad \text{Ec. 53}$$

$$b_{fango,d} \left(\frac{kJ}{kg \text{ agua}} \right) = \varphi \cdot 2.424 \left(\frac{kcal}{kg} \right) \cdot 4,187 \left(\frac{kJ}{kcal} \right) \cdot \frac{F.digerido \left(\frac{kg}{mes} \right)}{Q \left(\frac{m^3}{mes} \right) \cdot \rho_w \left(\frac{kg}{m^3} \right)} \quad \text{Ec. 54}$$

Los compuestos químicos empleados son el cloruro férrico y el polielectrolito, cuya exergía se obtienen mediante expresiones similares a las ecuaciones 37 y 38, empleado en estos casos la exergía química específica correspondiente a estos elementos (ver tabla 3)

Al no disponer de datos reales de consumos eléctricos correspondientes a cada uno de las etapas consideradas dentro de la depuradora, se han tomado porcentajes de reparto según bibliografía consultada [36], siendo un 33% para tratamiento primario, 44% para secundario y 23 % para tratamiento de los fangos.

La exergía específica para el biogás se ha obtenido a partir de los datos de composición, temperatura y presión relativos al biogás, siendo el valor de su exergía específica igual a 127.985 kcal/kmol.

$$B_{biogás} \left(\frac{kJ}{mes} \right) = 4,187 \frac{127.985 \left(\frac{kcal}{kmol} \right) \cdot \rho_{biogás} \left(\frac{kg}{Nm^3} \right)}{PM_{biogás} \left(\frac{kg}{kmol} \right)} Q_{biogás} \left(\frac{Nm^3}{mes} \right) \quad \text{Ec. 55}$$

En el caso de los gases de escape se ha calculado la exergía específica de los gases frío y calientes, donde la variación de exergía se corresponde con la diferencia en la componente

térmica al variar la temperatura. Los resultados así obtenidos para el gas caliente y frío han sido de 285,2 kJ/kg y 83,51 kJ/kg, respectivamente.

$$B_{gases,cal} \left(\frac{kJ}{mes} \right) = 285,2 \left(\frac{kJ}{kg} \right) m_{gas} \left(\frac{kg}{h} \right) 24 \left(\frac{h}{dia} \right) \left(\frac{dias}{mes} \right) \text{ Ec. 56}$$

$$B_{gases,frío} \left(\frac{kJ}{mes} \right) = 83,51 \left(\frac{kJ}{kg} \right) m_{gas} \left(\frac{kg}{h} \right) 24 \left(\frac{h}{dia} \right) \left(\frac{dias}{mes} \right) \text{ Ec. 57}$$

Por último se tiene el circuito de agua de refrigeración de las camisas. En este circuito la exergía específica del flujo de salida y retorno del agua caliente se obtiene considerándose un fluido térmico. La exergía específica obtenida para el agua de salida y retorno ha sido de 30,02 kJ/kg y 25,35 kJ/kg, respectivamente.

$$B_{agua,s} \left(\frac{kJ}{mes} \right) = 30,02 \left(\frac{kJ}{kg} \right) m_{agua} \left(\frac{Nm^3}{h} \right) \rho_w \left(\frac{kg}{Nm^3} \right) 24 \left(\frac{h}{dia} \right) \left(\frac{dias}{mes} \right) \text{ Ec. 58}$$

$$B_{agua,e} \left(\frac{kJ}{mes} \right) = 25,35 \left(\frac{kJ}{kg} \right) m_{agua} \left(\frac{Nm^3}{h} \right) \rho_w \left(\frac{kg}{Nm^3} \right) 24 \left(\frac{h}{dia} \right) \left(\frac{dias}{mes} \right) \text{ Ec. 59}$$

Tanto el calor contenido en los gases de escape como en las camisas de refrigeración se emplea en el calentamiento del digestor, por lo que se ha definido la exergía de calor de entrada a este como:

$$B_Q = B_{gases,cal} - B_{gases,frío} + B_{agua,s} - B_{agua,e}$$

La exergía absoluta para cada uno de los flujos considerados está recogida en las siguientes tablas (en valores anuales totales del 2010).

Tabla 8. Exergía total de los flujos en la línea de aguas.

Línea de aguas									
Exergía total primario (kJ)						Exergía total secundario (kJ)			
Entradas		Salidas				Entradas		Salidas	
$B_{w,e}$	B_{EC1}	B_{w1}	$B_{are,rec}$	B_{grasas}	B_{fango1}	B_{w1}	B_{EC2}	B_{fango2}	$B_{w,s}$
1,13E+11	8,03E+08	9,61E+10	1,23E+06	2,47E+05	1,11E+10	9,61E+10	1,07E+09	2,87E+10	4,26E+10

Tabla 9. Exergía total de los flujos en el tratamiento de los fangos.

Tratamiento de fangos							
Exergía total entradas (kJ)						Exergía total salidas (kJ)	
B_{fango1}	B_{fango2}	B_{poly}	B_{Cl3Fe}	B_{EC3}	B_Q	B_{biogas}	$B_{fango,d}$
1,11E+10	2,87E+10	3,36E+08	1,18E+08	5,60E+08	2,87E+09	1,94E+10	1,59E+10

Tabla 10. Exergía total de los flujos en la etapa de valorización energética.

Valorización de los fangos					
Exergía total flujos (kJ)					
$B_{\text{biogás}}$	$B_{\text{gases, frío}}$	$B_{\text{gases, cal}}$	$B_{\text{agua, s}}$	$B_{\text{agua, e}}$	B_{Elect}
1,94E+10	9,07E+08	3,10E+09	7,61E+09	6,43E+09	6,31E+09

El cálculo de los diferentes índices exergéticos se muestra a continuación:

- ✓ Proceso global: se considera Fuel el agua de entrada a la planta y todas las exergías necesarias para que se lleve a cabo el proceso de depuración, es decir, electricidad y compuesto químicos añadidos. El Producto es el agua tratada de salida de la planta, mientras que el residuo en este caso será el fango digerido.

$$k_{\text{prod}} = \frac{B_{w,e} + B_{Cl3Fe} + B_{\text{poly}} + B_{EC}}{B_{w,s}} = 2,72$$

$$k_{\text{proc}} = \frac{B_{w,e} + B_{Cl3Fe} + B_{\text{poly}} + B_{EC}}{B_{w,s} + B_{\text{fango,d}}} = 1,98$$

$$\eta_{\text{prod}} = \frac{1}{k_{\text{prod}}} = 0,37$$

$$\eta_{\text{proc}} = \frac{1}{k_{\text{proc}}} = 0,51$$

- ✓ Tratamiento primario: el Fuel es el agua de entrada a la planta y el consumo eléctrico en esta etapa, se considera producto el agua tratada de salida del decantador primario y como residuo los fangos primarios.

$$k_{\text{prod},1} = \frac{B_{w,e} + B_{EC1}}{B_{w,1}} = 1,18$$

$$k_{\text{proc},1} = \frac{B_{w,e} + B_{EC1}}{B_{w,1} + B_{\text{fango},1}} = 1,06$$

$$\eta_{\text{prod},1} = \frac{1}{k_{\text{prod},1}} = 0,84$$

$$\eta_{\text{proc},1} = \frac{1}{k_{\text{proc},1}} = 0,94$$

- ✓ Tratamiento secundario: el Fuel es el agua de salida del tratamiento primario y el consumo eléctrico es esta etapa, el Producto es el agua de salida de la planta una vez tratada y residuo los fango biológicos.

$$k_{prod,2} = \frac{B_{w,1} + B_{EC2}}{B_{w,2}} = 2,28$$

$$k_{proc,2} = \frac{B_{w,1} + B_{EC2}}{B_{w,s} + B_{fango,2}} = 1,36$$

$$\eta_{prod,2} = \frac{1}{k_{prod,2}} = 0,44$$

$$\eta_{proc,2} = \frac{1}{k_{proc,2}} = 0,73$$

- ✓ Tratamiento de los fangos: esta etapa el Fuel está compuesto por los fangos primarios y biológicos, consumo eléctrico asociado a la etapa, compuestos químicos añadidos para el tratamiento y calor necesario en el digestor. El biogás es el Producto deseado, mientras que el Residuos son los fangos digeridos.

$$k_{prod,3} = \frac{B_{fango,1} + B_{fango,2} + B_{poly} + B_{Cl3Fe} + B_{EC3} + B_Q}{B_{biogás}} = 2,25$$

$$k_{proc,3} = \frac{B_{fango,1} + B_{fango,2} + B_{poly} + B_{Cl3Fe} + B_{EC3} + B_Q}{B_{fango,d} + B_{biogás}} = 1,24$$

$$\eta_{prod,3} = \frac{1}{k_{prod,3}} = 0,45$$

$$\eta_{proc,3} = \frac{1}{k_{proc,3}} = 0,8$$

- ✓ Proceso de valorización energética: el biogás alimentado al MACI es considerado como el Fuel, el Producto es la electricidad producida mientras que el Residuo es el calor disipado tanto por camisas como gases de escape.

$$k_{prod,val} = \frac{B_{biogás}}{B_{Elect.}} = 3,08$$

$$k_{proc,val} = \frac{B_{biogás}}{B_{Elect} + B_Q} = 2,01$$

$$\eta_{prod,val} = \frac{1}{k_{prod,val}} = 0,33$$

$$\eta_{proc,val} = \frac{1}{k_{proc,val}} = 0,50$$

- ✓ Eficiencia de eliminación de residuos: considerando como residuos los fangos procedentes del tratamiento primario y secundario, junto con el resto de productos retirados durante el primario, la eficiencia de eliminación de residuos sería:

$$\eta_{elim,res} = \frac{B_{fango1} + B_{fango2} + B_{grasas} + B_{are,rec}}{B_{w,e} + B_{EC1} + B_{EC2}} = 0,27$$

4.3 Depuradora: “La Cartuja”

El análisis exergético a la depuradora de “La Cartuja” se ha realizado considerando varias etapas dentro del proceso de depuración, al igual que se procedió con el caso de “La Almozara”. Las etapas de nuevo comprenden tratamiento primario y tratamiento secundario, lo que correspondería con la línea de aguas; tratamiento de los fangos, el cual engloba las etapas de espesado, deshidratación y horno de donde se obtiene un caudal de gases calientes; y por último la etapa de valorización energética, que en este caso se realiza por medio de un ciclo de potencia con turbina de vapor. Los esquemas con los flujos de entrada y salida de cada una de las etapas se muestran en las Ilustración 5 e Ilustración 6.

La metodología de cálculo para obtener la exergía específica de los flujos de agua, ($b_{w,e}$, $b_{w,1}$ y $b_{w,s}$), grasas retiradas en el proceso (b_{grasa}) y compuestos químicos añadidos (b_{Cl3Fe} y b_{poly}) es igual a la ya descrita para el caso de “La Almozara”. Lo mismo ocurre para el caso de los fangos primarios y biológicos, donde las ecuaciones a aplicar son las ya mostradas en el caso de “La Almozara” con la diferencia del PCI de los fangos biológicos que en este caso es de 4.141 (dato real suministrado por Utedeza).

Los consumos eléctricos en cada una de las etapas consideradas en la depuradora se han estimado a partir del listado equipos instalados en la planta. Los porcentajes obtenidos son de 31% para el primario, 42% para el secundario y 26% para tratamiento de fangos.

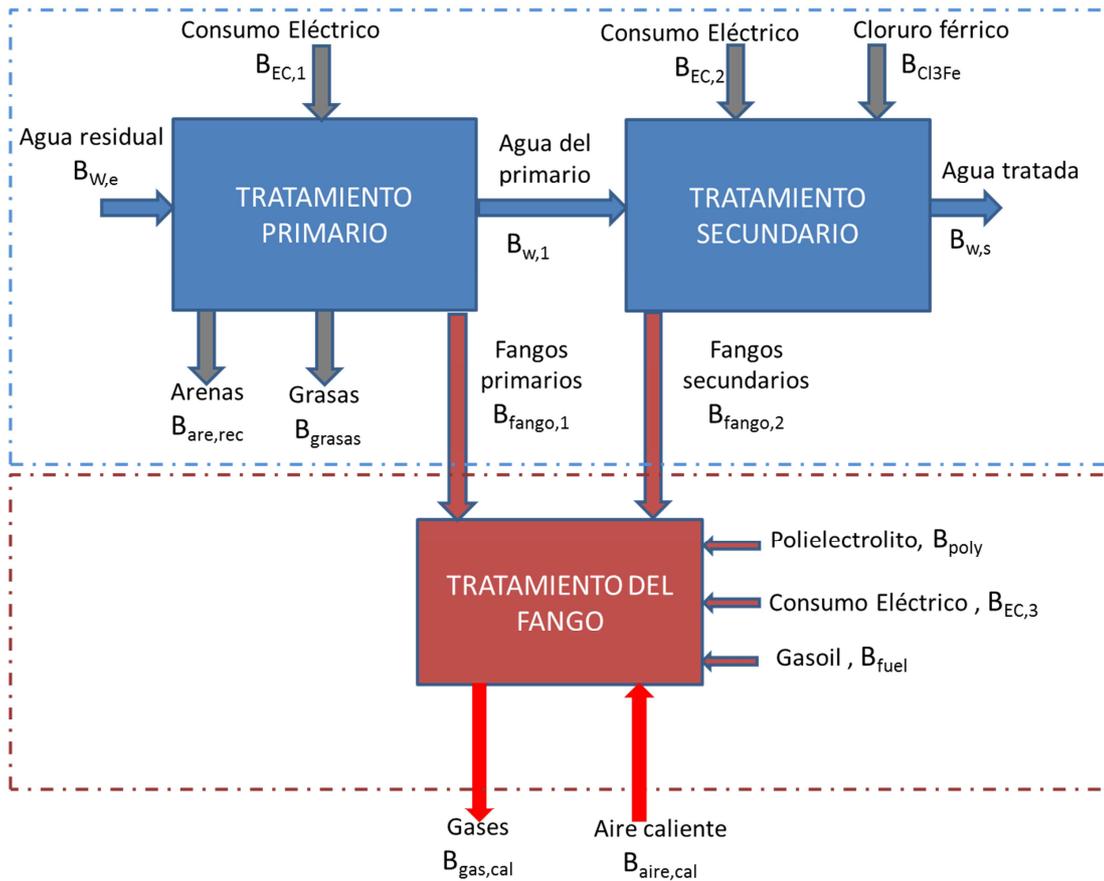


Ilustración 5. Esquema input-output para balance exergético en línea de aguas y tratamiento de fangos en “La Cartuja”

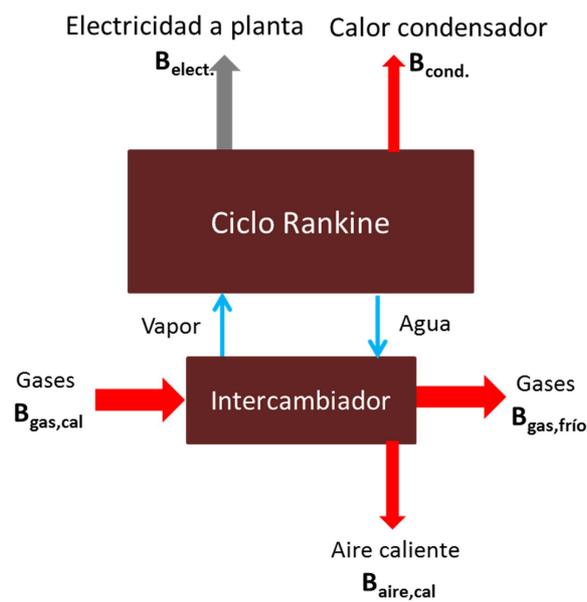


Ilustración 6. Esquema input-output para balance exergético en ciclo de potencia de “La Cartuja”

Tabla 11. Exergías totales línea de aguas de “La Cartuja”

Línea de aguas										
Exergía total primario (kJ)						Exergía total secundario (kJ)				
Entradas		Salidas				Entradas			Salidas	
$B_{w,e}$	B_{EC1}	B_{w1}	$B_{are,rec}$	B_{grasas}	B_{fango1}	B_{w1}	B_{Cl3Fe}	B_{EC2}	B_{fango2}	$B_{w,s}$
6,17E+11	2,97E+10	5,09E+11	8,90E+09	4,19E+06	1,10E+11	5,09E+11	6,42E+09	4,04E+10	1,89E+11	1,95E+11

En la etapa de tratamiento de los fangos y valorización de los mismos tenemos que considerar el flujo de gases, tanto calientes como fríos, el aire caliente, el combustible auxiliar empleado en el horno y el ciclo de potencia, en el cual tendremos flujos de vapor-agua con una producción de electricidad y un flujo de calor en el condensador. La exergía específica para los flujos de gases es de 594 kJ/kg gas para el caso de los gases calientes, y 150 kJ/kg gas para los gases fríos. En el caso del aire de combustión se ha obtenido una exergía específica de 21,91 kJ/kg aire. El combustible auxiliar empleado en el horno es gasoil, un combustible líquido cuya exergía específica es de 45.436 kJ/kg fuel.

Tabla 12. Exergías totales etapa tratamiento de fangos.

Tratamiento de fangos						
Exergía total entradas (kJ)						Exergía total salidas (kJ)
B_{fango1}	B_{fango2}	B_{poly}	B_{fuel}	B_{EC3}	$B_{aire,cal}$	$B_{gas,cal}$
1,10E+11	1,89E+11	1,99E+09	2,88E+09	2,57E+10	3,08E+09	1,36E+11

En el caso del ciclo de potencia se han obtenido la exergía específica de cada una de las corrientes que lo componen: fluidos térmicos, la electricidad producida y el flujo de calor disipado en el condensador, para el cual se ha aplicado la siguiente expresión:

$$B_{cond}(kW) = Q(kW) \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_{sat}}\right) \text{ Ec. 60}$$

Dónde:

$$Q(kW) = (h_4 - h_5) \left(\frac{kJ}{kg}\right) \cdot \left(\frac{m_{vapor \text{ a turbina}} \left(\frac{kg}{h}\right)}{3600}\right) \text{ Ec. 61}$$

Y T_{sat} representa la temperatura de saturación a la cual trabaja el condensador (333,2 K).

Tabla 13. Exergía específica corrientes ciclo de potencia.

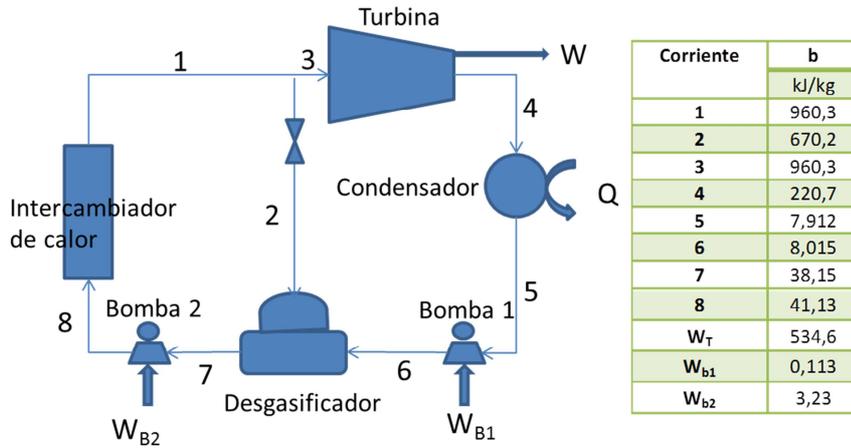


Tabla 14. Exergías totales etapa de valorización energética.

Valorización energética				
Exergía total entradas (kJ)	Exergía total salidas (kJ)			
$B_{gas,cal}$	$B_{gas,frio}$	B_{aire}	B_{electr}	B_{cond}
1,36E+11	3,45E+10	3,08E+09	1,39E+10	6,76E+09

El cálculo de los índices exergéticos se realiza a continuación:

- ✓ Proceso global: se considera como Fuel el agua residual de entrada, los compuestos químicos añadidos, el consumo eléctrico y el gasoil empleado en el horno, siendo el Producto el agua tratada de salida y residuos el calor del condensador y el gas frío (por tanto difiere del caso de “La Almozara”).

$$k_{prod} = \frac{B_{w,e} + B_{Cl3Fe} + B_{poly} + B_{EC} + B_{fuel}}{B_{w,s}} = 3,70$$

$$k_{proc} = \frac{B_{w,e} + B_{Cl3Fe} + B_{poly} + B_{EC}}{B_{w,s} + B_{cond} + B_{gas,frio}} = 3,06$$

$$\eta_{prod} = \frac{1}{k_{prod}} = 0,27$$

$$\eta_{proc} = \frac{1}{k_{proc}} = 0,33$$

- ✓ Tratamiento primario: igual al ya descrito para “La Almozara”

$$k_{prod,1} = \frac{B_{w,e} + B_{EC1}}{B_{w,1}} = 1,27$$

$$k_{proc,1} = \frac{B_{w,e} + B_{EC1}}{B_{w,1} + B_{fangos,1}} = 1,04$$

$$\eta_{prod,1} = \frac{1}{k_{prod,1}} = 0,78$$

$$\eta_{proc,1} = \frac{1}{k_{proc,1}} = 0,95$$

- ✓ Tratamiento secundario: igual a “La Almozara” incluyendo ahora dentro del Fuel el compuesto químico empleado.

$$k_{prod,2} = \frac{B_{w,1} + B_{EC2} + B_{Cl3Fe}}{B_{w,2}} = 2,84$$

$$k_{proc,2} = \frac{B_{w,1} + B_{EC2} + B_{Cl3Fe}}{B_{w,s} + B_{fangos,2}} = 1,45$$

$$\eta_{prod,2} = \frac{1}{k_{prod,2}} = 0,35$$

$$\eta_{proc,2} = \frac{1}{k_{proc,2}} = 0,69$$

- ✓ Tratamiento de los fangos: el Fuel está compuesto por la exergía de los fangos, primario y biológico, los compuestos químicos añadidos, el consumo eléctrico, el aire caliente de entrada al horno y el gasoil alimentado. En este proceso tenemos como Producto el gas caliente obtenido, no considerándose ningún residuo. Se ha calculado por separado el rendimiento del horno.

$$k_{prod,3} = \frac{B_{fangos,1} + B_{fangos,2} + B_{poly} + B_{aire} + B_{EC3} + B_{fuel}}{B_{gas,cal}} = 2,44$$

$$\eta_{prod,3} = \frac{1}{k_{prod,3}} = 0,41$$

$$k_{horno} = \frac{B_{fangos,1} + B_{fangos,2} + B_{aire} + B_{fuel}}{B_{gas,cal}} = 2,39$$

$$\eta_{horno} = \frac{1}{k_{horno}} = 0,45$$

- ✓ Proceso de valorización energética. Siguiendo el mismo enfoque que se ha empleado durante todo el estudio, se va a considerar en primer lugar para el coste exergético del producto el fuel como la exergía de los gases calientes y el

producto la electricidad producida, mientras que para el proceso se consideraran como residuos la exergía del gas frío y el aire caliente.

$$k_{prod,val} = \frac{B_{gas,cal}}{B_{Elect.}} = 9,77$$

$$k_{proc,val1} = \frac{B_{gas,cal}}{B_{Elect} + B_{gas,frío} + B_{aire}} = 2,64$$

$$\eta_{prod,val} = \frac{1}{k_{prod,val}} = 0,10$$

$$\eta_{proc,val1} = \frac{1}{k_{proc,val}} = 0,38$$

Si en la definición de coste exergético del proceso se incluye ahora como residuo, a los ya mencionados anteriormente, la exergía contenida en el flujo de calor del condensador, no aprovechada en estos momentos, el coste y eficiencia quedarían como:

$$k_{proc,val2} = \frac{B_{gas,cal}}{B_{Elect} + B_{gas,frío} + B_{aire} + B_{cond}} = 2,34$$

$$\eta_{proc,val2} = \frac{1}{k_{proc,val2}} = 0,43$$

- ✓ Eficiencia de eliminación de residuos: se consideran como Residuos el fango primario y secundario, junto con las grasas y arenas.

$$\eta_{elim,res} = \frac{B_{fango1} + B_{fango2} + B_{grasas} + B_{are,rec}}{B_{w,e} + B_{EC1} + B_{EC2} + B_{Cl3Fe}} = 0,44$$

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Con la realización del presente estudio se ha podido demostrar la validez de la aplicación del análisis exergético a plantas de tratamiento de aguas reales (potabilizadora y depuradoras), siendo posible la comparación de los distintos procesos que se llevan a cabo en las mismas. Se ha aplicado no solamente al proceso global de potabilización y depuración, sino también a las diferentes etapas de tratamiento dentro de las depuradoras, pudiendo conocer la eficiencia de cada una de ellas y pudiendo compararse los diferentes procesos de valorización de fangos. El llevar a cabo valorización de los fangos obtenidos es de vital importancia dado el gran contenido exergético que estos presentan.

El objetivo final es analizar la eficiencia energética de la forma más desagregada posible de las tecnologías más consumidoras de energía dentro del ciclo integral del agua, para buscar los puntos de mayor consumo energético en el proceso y por tanto incidir en la mejora tecnológica de dichos puntos. En este punto es conveniente recordar el gran peso del consumo energético derivado del ciclo del agua respecto al consumo total: según el estudio más reciente para España, supone el 7% del consumo energético total [48]. Con ello se pretende dar una visión complementaria al estudio de mejoras en la eficacia del proceso de tratamiento de aguas, en un momento en el que tecnológicamente es factible obtener un agua de la calidad exacta requerida por el usuario final, con diferentes técnicas y métodos (membranas, filtros, UV, ozono, etc).

Haciendo un resumen de los resultados obtenidos con el análisis exergético, el proceso de potabilización en la depuradora de “Casablanca” muestra mayor eficiencia energética con respecto a los procesos de depuración. Este hecho demuestra que el hecho el proceso de eliminación de residuos de un agua superficial a un agua potable (en cuanto a calidad es muy similar, y por tanto en cuanto a contenido exergético todavía más) en una potabilizadoras es mucho menos intensivo que la eliminación de SS y MO de unas aguas residuales urbanas de una depuradora, y ello se traduce en un menor consumo de recursos para realizarse. Ello redunda en tener unos bajos índices de eliminación del residuo en el caso de potabilizar, y altos valores en el caso de depurar. La tabla 15 muestra un resumen comparativo de resultados globales de ambas plantas.

Tabla 15. Resumen resultados obtenidos plantas de tratamiento.

Planta	Índice Exerg.	Proceso Global	Primario	Secundario	Tratam. Fangos	Valorización
Almozara	k _{proc}	1,98	1,06	1,36	1,24	2,01
	k _{prod}	2,72	1,18	2,28	2,25	3,08
Cartuja	k _{proc}	3,06	1,04	1,45	2,44	2,64
	k _{prod}	3,7	1,27	2,84		9,77
Casablanca	k _{proc}	1,161	n.a	n.a	n.a	n.a
	k _{prod}	1,254				

*n.a: no aplica

Hay que reseñar, sobre todo en el caso de la potabilizadora de “Casablanca”, el gran peso del contenido exergético del agua bruta (entrada) y del agua potable (salida), que hace que un mayor consumo energético en planta (eléctrico, en kWh/m³) no suponga un incremento significativo del coste exergético: es una de las ventajas que ofrece el análisis exergético frente

al energético, el que permita ver donde existe energía útil que no es aprovechada tecnológicamente en la actualidad. También en el caso de la potabilizadora, es interesante hacer una revisión temporal de los indicadores, teniendo en cuenta que a partir del 2009 existe la infraestructura de captación de aguas desde el embalse de Yesa (con almacenamiento intermedio en La Loteta), con una calidad mucho mayor que el agua captada del Canal Imperial, o incluso del Ebro (en períodos de limpieza del mismo): se observa que los rendimientos exergéticos son peores durante el año 2.008, año en el cual se empleó una mayor cantidad de reactivos.

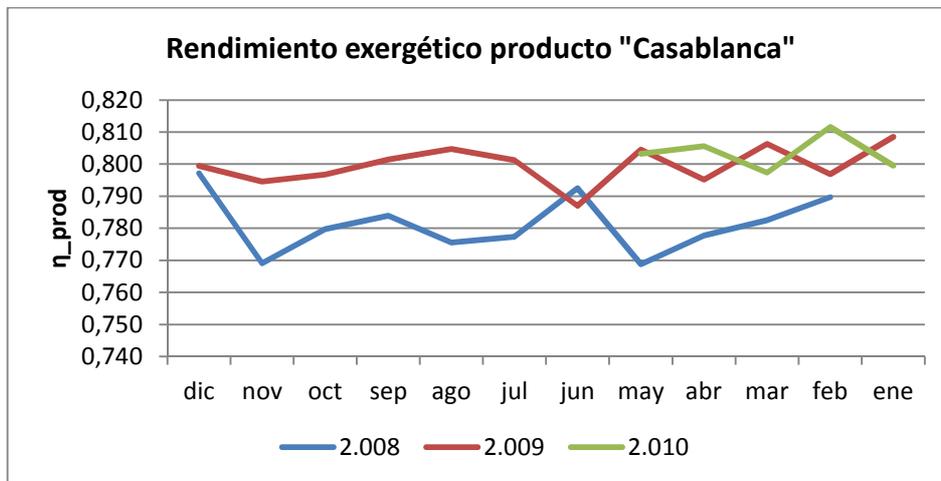


Ilustración 7. Variación rendimiento exergético en "Casablanca".

Comparando el proceso global de depuración tanto en "La Almozara" como en "La Cartuja" se ve el coste exergético en "La Almozara", tanto el del proceso (1,98) como producto (2,72) es menor que en "La Cartuja", 3,06 y 3,70. Para el caso de "La Almozara" y después de haber realizado la digestión anaerobia, se obtiene como residuo un fango digerido, el cual, aunque ha reducido su contenido energético con respecto al fango sin digerir, sigue teniendo un valor exergético y posibilidad por tanto de valorización energética [41], de aquí la diferencia encontrada entre el coste exergético del producto (2,72) y del proceso (1,98). En el caso de "La Cartuja" la diferencia entre ambos costes no es tan elevada, obteniéndose como residuo un calor aprovechable. Es necesario recordar aquí que "La Cartuja" es una planta que tiene un coste energético no habitual, derivado del sistema de desodorización que cuenta en sus instalaciones cerradas, y que está cargado equitativamente a todas las etapas de su proceso. Además, "La Cartuja" trata aguas provenientes del polígono industrial de Malpica, que presentan en general un mayor coste de depuración.

Ahondando en el análisis exergético por etapas en los tratamientos de depuración, se observa que dentro de la línea de aguas el tratamiento primario presenta unos costes exergéticos menores que el secundario. En el análisis de estas etapas se ha podido comprobar el gran valor exergético de los residuos, en este caso fangos, que se generan en las depuradoras, lo que hace necesario su aprovechamiento.

En la línea de tratamiento de fangos, como se definió con anterioridad, se considera como producto la obtención del biogás, en el caso de “La Almozara” y para “La Cartuja” la obtención de gases de escape calientes del horno. Los costes exergéticos del producto para ambos casos son similares 2,25 y 2,44, para “La Almozara” y “La Cartuja”. Sin embargo, el proceso de digestión anaerobia no solo tiene como producto el biogás, sino que hay unos fangos digeridos como residuo con un contenido exergético, con lo que el coste exergético del proceso se podría mejorar hasta 1,24. Por tanto, se puede concluir que el tratamiento de los fangos mediante un proceso de digestión anaerobia presenta mejor eficiencia exergética.

Comparando los procesos de valorización energética, en el caso de estudio, biogás como combustible en un motor de combustión interna y gases de combustión a alta temperatura en un ciclo de potencia, se ha visto que considerando únicamente como producto la electricidad que se obtiene, el empleo del MACI en “La Almozara” presenta unos rendimientos exergéticos más elevados, del orden de 0,33. En “La Cartuja” donde se emplea un intercambiador y ciclo de potencia con el vapor generado, el proceso de obtención de electricidad como producto único presenta un rendimiento exergético muy bajo, de 0,10. El uso del calor desprendido en el MACI (camisas y gases de escape) en “La Almozara” mejora el rendimiento exergético del proceso hasta un 0,5. En “La Cartuja”, considerando los residuos aprovechados en el proceso, el rendimiento exergético es mejorado hasta un 0,38. Sin embargo hay un calor residual en el condensador con un contenido exergético que actualmente se disipa por medio de torres de refrigeración a una temperatura ciertamente elevada, que de ser aprovechado mejoraría el rendimiento exergético del proceso hasta un 0,43. Es de reseñar aquí que el diseño del ciclo de vapor de recuperación de calor de los fangos incinerados es francamente mejorable (véase por ej. la estrangulación de vapor vivo a 28 bar para alimentar el desgasificador a 3 bar, o la producción de vapor con incluso fracción líquida en la expansión de la turbina).

En cuanto a las consideraciones con respecto a los cálculos, su error sistemático producido, y su posible afinamiento futuro dentro de esta línea de trabajo, es conveniente destacar los siguientes puntos:

- ✓ Se ha trabajado con los datos temporales disponibles más detallados (medias mensuales), y ello conlleva a no poder discernir episodios anómalos puntuales de la operación de la planta (con una elevada inercia por otra parte en el caso de procesos biológicos). También han podido introducirse datos reales incorrectos, y existen flujos no continuos como la retirada de fangos. Todo ello puede explicar la obtención de rendimientos mensuales muy ligeramente superiores a la unidad en algunos casos puntuales, y la dificultad de analizar tendencias temporales debidas a un único cambio de algún parámetro significativo a la entrada de las plantas.
- ✓ Para realizar el análisis por subsistemas en las depuradoras, ha sido necesario en algunos casos emplear valores, ratios y rendimientos de eliminación de bibliografía para realizar los cálculos de algunos flujos exergéticos.
- ✓ Es crucial conocer la determinación de la composición exacta de los fangos en sus diferentes estadios, ya que incorporan un contenido exergético muy alto y por tanto afecta a la exactitud de los resultados finales: en la mayoría de los casos no se ha contado con su caracterización exacta.

6. BIBLIOGRAFÍA.

- [1] Valero Capilla, A and Valero Delgado, A. 2010. Exergy analysis of resources and processes. Prensas Universitarias de Zaragoza. 1ª Edición.
- [2] Kotas, T.J. 1985. The exergy method of thermal plant analysis. Ed Essex.
- [3] Valero, A. 1998. Thermoconomics as a conceptual basis for energy ecological analysis. Proceeding of the 1st International workshop Advances in Energy Studies. Pp. 415-444. SG Editoriali Padova.
- [4] UN-WWAP, 2006. El Agua, una responsabilidad compartida. World Water Assessment Programme. United Nations. Unesco.
- [5] Valero, A; Uche, J; Valero, Al; Martínez, A. 2008. Physical Hydronomics: Application of the exergy analysis to the assessment of environmental costs of water bodies. The case of the inland basins of Catalonia. Energy. Vol. 34 pp.2101-2107.
- [6] Gaggioli, R. and Petit, P. 1976. Second Law analysis for pinpointing the true inefficiencies in final conversion systems. A.C.S. Division of Fuel Chemistry, 21.
- [7] Sussman, M. 1979. Choosing a reference environment-state for available-energy computations. In 72nd Annual Meeting. American Institute of Chemical Engineers, San Francisco (USA).
- [8] Ahrendts, J. 1977. The exergy of chemically reacting systems. Technical report, VDI. Forschungsheft 579, Düsseldorf, 1977.
- [9] Van Gool W. Thermodynamics of chemical references for exergy analysis. Florence world energy research symposium, Florence, Italy: SGE Editorial, pp 949-957.
- [10] Szargut, J. 1989. Chemical exergies of the elements. Applied Energy, Vol. 32, pp 269-286.
- [11] Martinez, A. 2009. Exergy cost assessment of water resources: Physical Hydronomics. Ph.D. Thesis. Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Zaragoza.
- [12] <http://www.seafriends.org.nz/oceano/seawater.htm>
- [13] Lozano, M.A, Valero, A. Determinación de la exergía para sustancias de interés industrial. ETSII Universidad de Zaragoza. Departamento de Termodinámica y Fisicoquímica.

- [14] Zaleta-Aguilar, A.; Ranz, L., Valero, A. 1998. Towards a Unified measure of renewable resources availability: The exergy method applied to the water of a river. *Energy Conversion Management*. Vol. 39 nº 16-18, pp. 1911-1917. Pergamon.
- [15] Szargut, J. 2005. *Exergy Method, Technical and Ecological Application*. WIT Press.
- [16] Hellström, D. 1997. An exergy analysis for a wastewater treatment plant- an estimation of the consumption of physical resources. *Water Environment Research* Vol. 69, nº1. pp. 44-51
- [17] Tai, S.; Matsushige, K.; Goda, T. 1986. Chemical exergy of organic matter in wastewater. *International Journal Environmental Studies*. Vol 27, pp. 301-315.
- [18] Martínez, A. and Uche, J. 2009. Chemical exergy assessment of organic matter in a water flow. *Energy*. Vol 35. Pp 77-84.
- [19] Martínez, A; Uche, J; Rubio, C; Carrasquer, B. 2010. Exergy cost of water supply and water treatment technologies. *Desalination and water treatment*. Vol 24. Pp 123-131.
- [20] Exergy Calculator, <http://www.exergoecology.com/excalc>
- [21] Hellström, D. 2003. Exergy analysis of nutrient recovery processes. *Water Science and Technology* Vol.48 nº1 pp. 27-36. IWA Publishing.
- [22] Metcalf and Eddy, Inc. 2003. *Wastewater Engineering Treatment and Reuse*. McGraw- Hill. Higher Education.
- [23] Spellman, F.R.; Drinan, J. 2000. *Manual del agua potable*. Editorial Acribia.
- [24] Romero, J.A. 1999. *Potabilización del agua*. 3ª Edición. Alfaomega grupo editor.
- [25] Sanz, D.A. 2011. *Posibilidades de Energía Solar para las tecnologías del ciclo integral del agua*. Proyecto Final de Carrera, Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial. Zaragoza.
- [26] Confederación hidrológica del Ebro, Control del estado de las masas de agua superficiales. Resultados de análisis de parámetros físico-químicos Yesa (Aragón).
- [27] Confederación hidrológica del Ebro, Control del estado de las masas de agua superficiales. Resultados de análisis de parámetros físico-químicos Canal Imperial (Zaragoza).
- [28] Isla de Juana, R. 2005. *Proyectos de Plantas de Tratamiento de Aguas*. Bellisco Ediciones.

- [29] Castells, X.E. 2005. Tratamiento y valorización energética de residuos. Ediciones Díaz de Santos.
- [30] Caterpillar, AG Biogas Continuous. Disponible en: <http://www.cat.com/power-generation/generator-sets/gas-generator-sets>
- [31] Rivero, R; Garfias, M. 2006. Standard chemical exergy of elements updates. Energy. Vol 31, pp. 3310-3326.
- [32] Valero, A; Lozano, M, Muñoz, M.A. 1986. A general theory of exergy saving I. On the exergy costs. Departamento de Termoeconomía y Química Física de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Universidad de Zaragoza.
- [33] Mora-Bejerano, C.H y Oliveira, S. 2006. Environmental Exergy Analysis of wastewater treatment plants. Thermal Engineering. Vol.5, pp. 24-29.
- [34] <http://www.fao.org/>
- [35] Valero, A; Torres, C. Course of Thermoeconomic Analysis.
- [36] Castell, D; García, M; Tormos, I; Ferrer, C. 2011. Optimización energética del sistema de aireación de una EDAR, Análisis comparativo de dos tecnologías. Tecnología del Agua: Captación, Tratamiento, Distribución y depuración del agua y su impacto ambiental. Vol 327, pp. 50-56.
- [37] Plaza, F y Garralón, G. Plataforma experimental para la valorización energética de fango de EDAR mediante gasificación. CADAGUA S.A., Departamento de I+D+i.
- [38] Colomer, F.J. Valorización de lodos digeridos de depuradora. Balance energético. 9º Congreso Nacional del Medio Ambiente. Cumbre del Desarrollo Sostenible.
- [39] Brizuela, E y Romano S.D. 2003. Combustión. Departamento de Ingeniería Mecánica y Naval Facultad de Ingeniería, UBA.
- [40] Barranco, A.E. Suministro de gasóleos C (gasóleo de calefacción) y a (gasóleo de automoción y grupos electrógenos) durante el año 2010. Prescripciones técnicas. CIEMAT.
- [41] Werther, J. y Ogada, T. 1999. Sewage sludge combustión. Progress in Energy and Combustion Science. Vol 25. Pp. 55-116.
- [42] Carrasquer, B.; Martínez, A. y Uche, J. An analysis of technical alternatives in a wastewater treatment plant by using sludge as energy resource. Fundación Circe, Universidad de Zaragoza.

- [43] Mora-Bejerano, C.H. y Oliveira Jr. 2009. Exergoenvironmental evaluation of wastewater treatment process. 22^o International ECOS Conference. Agosto 31-Septiembre 3 2009, Fox do Iguaçú, Brasil.
- [44] Gallegos-Muñoz, A.; Zaleta-Aguilar, A; Rangel-Hernández, H. 2003. On an Exergy Efficiency Definition of a Wastewater Treatment Plant. Int.J. Thermodynamics. Vol 6. Pp 169-176.
- [45] Zaleta-Aguilar, A., Ranz, L., Valero, A. 1998. Toward a unified measure of renewable resources availability: the exergy method applied to the water of a river. Energy Conversion Mang., vol 39, Pp. 1911-1917.
- [46] G.Q.Chen; Xi Ji. 2007. Chemical exergy based evaluation of water quality. Ecological Modelling. Vol 200. Pp. 259-268.
- [47] Szargut, J.; Valero, A.; Stanek, W. y Valero, Al. (2005) Towards an international legal reference environment In: Proceedings of ECOS 2005, Trondheim, Norway (June 20-22), pp. 409-420.
- [48] Hardy, L.; Garrido, A. 2010. Análisis y evaluación de las relaciones entre el agua y la energía en España. Papeles del Agua Virtual Nº 6. Fundación Botín.

ANEXOS

ANEXO A. PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE CALIDAD EN LAS AGUAS.

La calidad de las aguas está definida por una serie de parámetros que caracterizan su composición física, química y biológica. A continuación se recoge información sobre los diferentes parámetros que determinan la calidad de las aguas. Dicha información ha sido elaborada a partir de [22] y [23].

- ✓ Temperatura. La temperatura del agua residual suele ser más elevada que la del agua de suministro, debido principalmente al vertido de aguas calientes procedentes de las casas o los procesos industriales. En función de la situación geográfica, la temperatura media anual del agua residual puede variar entre 10-21°C, pudiéndose tomar 15,6°C como valor representativo. La importancia de este parámetro radica en su influencia sobre el desarrollo de la vida acuática, las reacciones químicas y velocidades de reacción, así como sobre la aptitud del agua para ciertos usos. Por otro lado el oxígeno es menos soluble en agua caliente que en agua fría. Es por ello que se debe tener en cuenta que un aumento importante en la temperatura puede provocar la mortalidad de la vida acuática, así como la proliferación indeseada de plantas acuáticas y hongos.
- ✓ pH. La concentración del ión hidrógeno es un parámetro de calidad de gran importancia tanto para el caso de aguas naturales como residuales. El intervalo de concentración adecuado para la adecuada proliferación y desarrollo de la vida biológica es bastante estrecho y crítico. El agua residual que presenta un valor de ion hidrógeno inadecuado tiene dificultades para su tratamiento por procesos biológicos. Un pH de 7 representa el estado neutro para aguas a 8°C.
- ✓ Turbidez. La turbidez es una propiedad que ayuda a cuantificar la cantidad de luz que atraviesa una columna de agua con partículas orgánicas dispersas y partículas inorgánicas. La dispersión de la luz se incrementa con la carga de partículas en suspensión. La turbidez se mide en Unidades Nefelométricas de Turbidez (NTU) pero también se puede medir en Unidades de Turbidez de Jackson (JTU). Las medidas de la turbidez se hacen normalmente en aguas limpias, en el sentido que son opuestas a las aguas residuales. La turbidez se puede relacionar con la cantidad de sílice como:

$$1 \text{ NTU} = 0,13 \text{ mg/l de SiO}_2$$

- ✓ Sólidos totales. Todos los contaminantes del agua que no sean gases, contribuyen al contenido de sólidos. Los sólidos pueden estar en el agua, bien en suspensión bien en disolución. El parámetro sólido se utiliza para evaluar y medir todos los sólidos disueltos y en suspensión del agua. Se pueden realizar varias pruebas diferentes respecto a los sólidos: los disueltos, los sedimentados, los suspendidos, los totales, los volátiles y la conductancia eléctrica.
- Total de sólidos disueltos (TDS). El valor de la muestra de agua se refiere a los sólidos en disolución. La materia disuelta está compuesta por moléculas orgánicas e inorgánicas e iones en disolución en el agua, la cual se pueden relacionar con la conductividad del agua.
 - Sólidos sedimentados. Son sólidos en suspensión, que se espera sedimenten por gravedad, en un depósito de sedimentación de gran tamaño.
 - Sólidos en suspensión (SS o TSS). Los sólidos no disueltos, se llaman también materia en suspensión. No tiene significado en el agua potable dado que la turbidez arroja un valor proporcional, y es más fácil de medir.
 - Sólidos totales. La cantidad de sólidos totales (TS) se obtiene como residuo después de someter al agua a un proceso de evaporación a una temperatura de entre 103-105°C.
 - Sólidos volátiles. Constituidos por compuestos orgánicos volátiles.
 - Conductividad o conductancia. Medida de la corriente eléctrica transmitida por las sustancias iónicas, por lo tanto los sólidos disueltos están directamente relacionados con esta medida. La expresión que los relaciona es la siguiente:

$$\text{TDS (mg/l)} = 0.64 \times \text{Conductividad } (\mu\text{S/cm}) \quad \text{Ec. 62}$$

- ✓ Materia orgánica. Los compuestos orgánicos están formados normalmente por combinaciones de carbono, hidrógeno, oxígeno, y en determinados casos por nitrógeno. También pueden estar presentes otros elementos como azufre, fósforo o hierro. Los principales grupos de sustancias que están presentes en las

aguas residuales son las proteínas (40-60 %), hidratos de carbono (25-50 %), grasas y aceites (10 %).

La medida del contenido de materia orgánica en un agua se puede determinar mediante diferentes ensayos, entre los que tenemos:

- **Demanda bioquímica de oxígeno (DBO).** El parámetro más ampliamente empleado, aplicable tanto a aguas residuales como a aguas superficiales es la DBO a 5 días (DBO₅). La determinación del mismo está relacionada con la medición del oxígeno disuelto que consumen los microorganismos en el proceso de oxidación bioquímica de la materia orgánica.
- **Demanda química de oxígeno (DQO).** El ensayo de este parámetro emplea un agente químico fuertemente oxidante en medio ácido para la determinación del equivalente de oxígeno de la materia orgánica al oxidarse. La DQO de un agua residual puede ser mayor que la DBO, siendo debido al mayor número de compuestos cuya oxidación tiene lugar por vía química frente a los que se oxidan por vía biológica.
- **Carbono orgánico total (COT).** Este método es indicado para pequeñas concentraciones de materia orgánica. El ensayo se realiza inyectando una cantidad conocida de muestra en un horno a alta temperatura o en un medio químicamente oxidante. En presencia de un catalizador, el carbono orgánico se oxida a anhídrido carbónico, la producción del cual se mide cuantitativamente mediante un analizador de infrarrojos.
- **Demanda teórica de oxígeno (DTO).** Este parámetro se puede calcular siempre que se disponga de la fórmula química de la materia orgánica.

Entre todas las formas de expresar el contenido de materia orgánica se pueden establecer relaciones constantes que dependerán del tipo de agua residual y de su origen.

Tabla 16. Correlaciones entre las diferentes medidas de contenido de materia orgánica (Adaptado de [22]).

Tipo de agua	BOD/COD	BOD/TOC	COD/TOC
Residual	0,3-0,8	1,2-2,0	2,909
Después del primario	0,4-0,6	0,8-1,2	2
Tratada	0,1-0,3	0,2-0,5	1,75

- ✓ Nitrógeno. El contenido total de nitrógeno está compuesto por nitrógeno orgánico, amoníaco, nitrito y nitrato. El contenido de nitrógeno orgánico se determina con el método Kjeldahl. En este método de análisis la muestra acuosa se hierve con el objeto de eliminar el amoníaco, para dar paso al proceso de digestión en el que el nitrógeno orgánico se transforma en amoníaco. El nitrógeno Kjeldahl total se determina del mismo modo que el nitrógeno orgánico, con la diferencia de que no se elimina el amoníaco presente antes del proceso de digestión. Por lo tanto el nitrógeno Kjeldahl total incluye ambas formas de nitrógeno, el amoniacal y el orgánico.

En la Ilustración 8 se representan las diferentes formas en las que el nitrógeno está presente en la naturaleza, junto con los diferentes mecanismos según los cuales van cambiando sus formas. El amoníaco y el amonio son las formas del nitrógeno que principalmente están presentes en las aguas, el suelo y como descomposición de plantas y residuos animales.

- ✓ Fósforo. El fósforo en exceso provoca nocivas proliferaciones de algas, por lo que es de interés el limitar la cantidad de compuestos de fósforo que puede alcanzar las aguas superficiales por medio de vertidos de aguas residuales domésticas e industriales.

Las formas más frecuentes en las que se presenta el fósforo en las disoluciones acuosas incluyen el ortofosfato, polifosfato y fosfatos orgánicos. Los ortofosfatos son PO_4^{-3} , HPO_4^{-2} , H_2PO_4^- , H_3PO_4 , y se hallan disponibles para el metabolismo biológico sin que sea precisa una ruptura posterior. La hidrólisis de los polifosfatos, proceso en el que se recuperan sus formas como ortofosfatos, tiene lugar en disolución acuosa. El fósforo orgánico es de poca importancia en la mayor parte de los residuos domésticos, pero puede ser un constituyente importante en vertidos industriales. En la Ilustración 9 se puede ver el ciclo natural del fósforo.

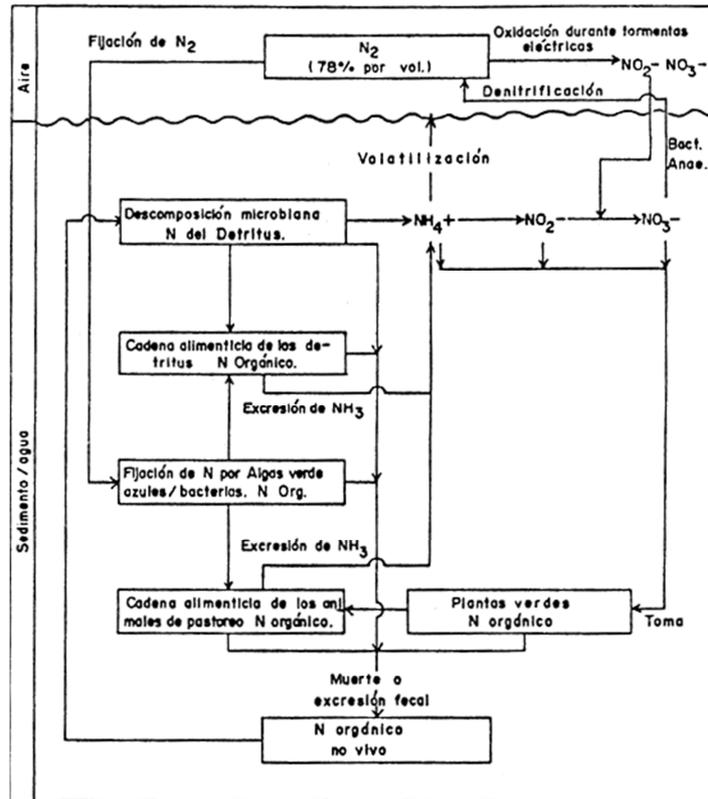


Ilustración 8. Ciclo del nitrógeno [34]

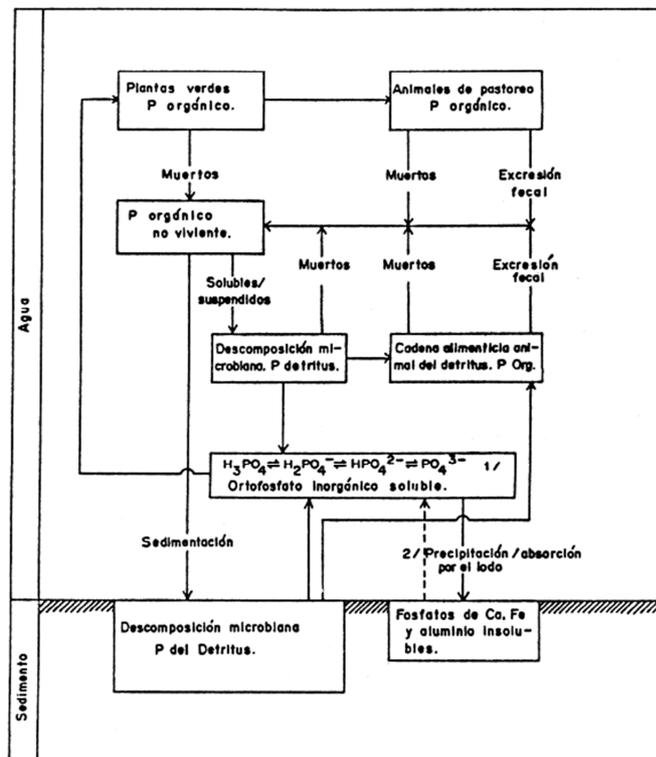


Ilustración 9. Ciclo del fósforo [34]

Tabla 17. Características de las aguas residuales (Adaptado de [22])

Características del agua residual.	
Propiedades físicas	<ul style="list-style-type: none"> Color Olor Sólidos Temperatura
Propiedades químicas	<ul style="list-style-type: none"> -Constituyentes orgánicos <ul style="list-style-type: none"> Carbohidratos Grasas animales, aceites Pesticidas Fenoles Proteínas Compuestos orgánicos volátiles Agentes tensoactivos -Constituyentes inorgánicos <ul style="list-style-type: none"> Alcalinidad Cloruros Metales pesados Nitrógeno Fósforo pH Azufre
Propiedades biológicas	<ul style="list-style-type: none"> Animales Plantas Protistas Virus

ANEXO B. PLANTAS DE TRATAMIENTO: DESCRIPCIÓN DETALLADA Y DATOS TÉCNICOS.

1. PLANTAS DE TRATAMIENTO

Los dos tipos principales de plantas de tratamiento de aguas son las de depuración y potabilización. A continuación se presenta una descripción general de ambos procesos de tratamiento a partir de la información recopilada de [22], [23] y [24].

1.1 Plantas de depuración.

Las estaciones depuradoras de aguas residuales tienen como objetivo reducir la carga de contaminantes del vertido, con el fin de hacerlo inocuo para el medio ambiente. Para poder alcanzar los objetivos de calidad del agua antes de su vertido impuestos por la directiva ambiental es necesaria la aplicación de diferentes etapas y procesos en la depuración. En la Tabla 18 se recogen algunos de los rendimientos de eliminación mediante los diversos procesos de depuración de los parámetros principales de medida de contaminación en las aguas residuales.

Tabla 18. Rendimientos de eliminación del constituyente en porcentaje mediante diversas operaciones y procesos unitarios empleados en el tratamiento primario y secundario (Adaptado de [22]).

	DBO	DQO	SS	P	N-org	NH₃-N
Rejas de barras	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo
Desarenadores	0-5	0-5	0-10	nulo	nulo	nulo
Sedimentación primaria	30-40	30-40	50-65	10-20	10-20	0
Fangos activados	80-95	80-85	80-90	10-25	15-50	8-15
Filtro percoladores	65-80	60-80	60-85	8-12	15-50	8-15
Biodiscos	80-85	80-85	80-85	10-25	15-50	8-15
Cloración	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo

1.1.1 Pretratamiento.

El pretratamiento de las aguas residuales tiene como objetivo la eliminación de los constituyentes cuya presencia pueda provocar problemas de mantenimiento y funcionamiento de los diferentes procesos, operaciones y sistemas auxiliares. Dentro del pretratamiento se incluyen los procesos de predesbaste, desbaste y dilaceración para la eliminación de sólidos gruesos y trapos, flotación para la eliminación de grasas y aceites y desarenado para la

eliminación de materia en suspensión gruesa que pueda causar obstrucciones en los equipos y desgaste.

1.1.2 Tratamiento primario.

En el tratamiento primario se elimina una fracción de los sólidos en suspensión y de la materia orgánica. Las operaciones físicas para la separación empleadas suelen ser el tamizado y la sedimentación, esta última más extendida y consistente en la separación por acción de la gravedad de las partículas suspendidas de mayor peso que el agua. Los equipos en los que se lleva a cabo reciben en nombre de decantadores primarios, de los cuales se obtiene un efluente clarificado y la producción de unos fangos (fangos primarios).

1.1.3 Tratamiento secundario.

El tratamiento secundario de las aguas residuales está encaminado principalmente a la eliminación de los sólidos en suspensión y de los compuestos orgánicos biodegradables. Este tratamiento incluye procesos como fangos activados, reactores de lecho fijo, los sistemas de lagunaje y la sedimentación. Los nutrientes contenidos en las aguas residuales, fósforo y nitrógeno, deben eliminarse igualmente de las aguas residuales y su eliminación suele realizarse en combinación con el tratamiento secundario; por ejemplo, se pueden añadir sales metálicas en los tanques de aireación para provocar la precipitación del fósforo en el proceso de decantación final, o se puede llevar a cabo un proceso de desnitrificación biológica como continuación de un proceso de fangos activados.

Como productos de este proceso se obtiene un agua tratada y unos fangos (fangos secundarios o biológicos). El agua tratada que sale de este tratamiento puede estar sometida a un tratamiento avanzado posterior que puede incluir coagulación química, floculación y sedimentación seguida de una filtración con carbón activo. Para la eliminación de iones específicos y para la reducción de sólidos disueltos, se emplean métodos menos comunes como intercambio iónico o la ósmosis inversa.

1.1.4 Tratamiento de fangos.

Los constituyentes del agua residual eliminados en las plantas de tratamiento incluyen basuras, arenas, espumas y fangos. El fango producido en las operaciones y procesos de tratamiento de las aguas residuales suelen ser un líquido o líquido semisólido con un contenido de sólidos. Los problemas derivados del manejo de los fangos son complejos debido a que el fango está formado principalmente por las sustancias responsables del carácter desagradable de las aguas residuales no tratadas, la fracción del fango a evacuar, generada en el tratamiento

biológico del agua residual, está compuesta principalmente por la materia orgánica y solo una pequeña parte del fango está compuesta por materia sólida.

El principal objetivo del tratamiento de los fangos es la reducción de su contenido en agua y materia orgánica, así como acondicionar el fango para su reutilización o evacuación final. Los principales métodos empleados en el tratamiento y evacuación del fango se recogen en la Tabla 19. El espesamiento (concentración), acondicionamiento, deshidratación y secado del fango, se utilizan para eliminar la humedad; la digestión, compostaje, incineración, oxidación con aire húmedo, y los reactores de tubo vertical, se utilizan principalmente para tratar y estabilizar la materia orgánica contenida en el fango.

El acondicionamiento químico el fango para la etapa de deshidratación permite reducir la humedad del fango desde el 90-99 % hasta el 65-85 %. Este acondicionamiento da lugar a la coagulación de los sólidos y la liberación del agua absorbida. Los productos químicos que se emplean incluyen el cloruro férrico, la cal, la alúmina y polímeros orgánicos.

Tabla 19. Métodos de tratamiento y evacuación de fangos (Adaptado de [22])

Operación unitaria	Función
Operaciones de pretratamiento	
Dilaceración	Reducción de tamaño
Desarenado	Eliminación de arenas
Mezclado	Mezclado
Almacenamiento	Almacenamiento
Espesamiento	
Por gravedad	Reducción de volumen
Por flotación	Reducción de volumen
Por centrifugación	Reducción de volumen
Por gravedad en filtros banda	Reducción de volumen
En tambor rotativo	Reducción de volumen
Estabilización	
Estabilización con cal	Estabilización
Digestión anaerobia	Estabilización, reducción de masa
Tratamiento térmico	Estabilización
Digestión aerobia	Estabilización, reducción de masa
Compostaje	Estabilización, recuperación de productos
Acondicionamiento	
Acondicionamiento químico	Acondicionamiento del fango
Acondicionamiento térmico	Acondicionamiento del fango

Deshidratación	
Filtro de vacío	Reducción de volumen
Centrífuga	Reducción de volumen
Filtro banda	Reducción de volumen
Filtro prensa	Reducción de volumen
Eras de secado	Reducción de volumen
Lagunaje	Almacenamiento y reducción de volumen
Secado	
Instantáneo	Reducción de peso, reducción de volumen
Por pulverización	Reducción de peso, reducción de volumen
En horno rotativo	Reducción de peso, reducción de volumen
En horno de pisos múltiples	Reducción de peso, reducción de volumen
Evaporación de efecto múltiple	Reducción de peso, reducción de volumen
Reducción térmica	
Hornos de múltiples pisos	Reducción de volumen, recuperación de energía
Horno de lecho fluidificado	Reducción de volumen
Incineración conjunta con residuos sólidos	Reducción de volumen
Oxidación por vía húmeda	Estabilización, reducción de volumen
Reactor vertical de pozo profundo	Estabilización, reducción de volumen
Evacuación final	
Aplicación al terreno	Evacuación final
Distribución y comercialización	Usos beneficiosos
Fijación química	Usos beneficiosos, evacuación final
A vertedero	Evacuación final
Lagunaje	Reducción de volumen

1.1.5 Procesos de precipitación química.

La precipitación química en el tratamiento de las aguas residuales lleva consigo la adición de productos químicos con la finalidad de alterar el estado físico de los sólidos disueltos y en suspensión, y facilitar su eliminación por sedimentación.

Los productos químicos que se suelen añadir al agua residual son: sulfato de alúmina, cal, cloruro férrico, sulfato férrico y sulfato ferroso.

Tabla 20. Productos químicos empleados en el tratamiento de agua residual.

Producto químico	Fórmula	Peso molecular
Sulfato de alúmina	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$	667,7
Cloruro férrico	FeCl_3	162,1
Sulfato férrico	$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$	400
Sulfato ferroso	$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	278
Cal	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	56 como CaO

1.2 Plantas de potabilización.

Una planta típica de tratamiento de agua potable (tratar agua procedente de aguas superficiales con turbidez y materia orgánica) utiliza varios procesos unitarios: desbaste, coagulación, floculación, sedimentación, filtración, ablandamiento, desinfección y flourización.

1.2.1 Desbaste o cribado.

El desbaste es el primer proceso de tratamiento al que es sometida el agua de entrada en una planta potabilizadora. Se define como el proceso por el cual los sólidos en suspensión de gran tamaño se eliminan del agua. La eliminación de estos sólidos es vital, no solo porque no pueden estar presentes en el agua potable, sino por los posibles daños que pueden causar en los equipos posteriores.

Las grandes plantas de potabilización emplean gran variedad de dispositivos de desbaste: rejillas, rejillas móviles, las de tambor, las de barras y las pasivas.

1.2.2 Coagulación

La coagulación es el segundo paso en el tratamiento del agua bruta, consistente en la sedimentación de los sólidos en suspensión formados por material muy pequeño. El agua es bombeada a grandes lagunas o balsas de sedimentación, conocidas como clarificadores o depósitos de asentamiento. Dentro de estos con condiciones de quietud, las partículas más densas se depositan en el fondo, dando lugar al lodo o fango. En este proceso de sedimentación no se eliminan todos los sólidos en suspensión, es ahí donde los coagulantes entran en juego. Los coloides o partículas muy finas se deben de coagular químicamente para genera flóculos más grandes eliminables por deposición o filtración.

Se pueden emplear diferentes productos químicos para la coagulación. Los más empleados son los basados en aluminio (sulfato de aluminio) y en hierro (sulfato férrico). En más frecuente es el sulfato de aluminio o alumbre: $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$.

1.2.3 Floculación

Las partículas desestabilizadas y los precipitados químicos son el resultado de la coagulación, con el fin de mejorar su sedimentación. Sin embargo, incluso después de la coagulación puede darse una sedimentación muy lenta. Con el fin de acelerar el proceso de sedimentación, se emplea la floculación. La floculación es un proceso lento en el que las partículas entran en contacto unas con otras para unirse y dar lugar a partículas de mayor tamaño que puedan sedimentar con rapidez. La floculación es el mecanismo principal en la eliminación de la turbidez del agua.

1.2.4 Sedimentación

La sedimentación es el proceso convencional de tratamiento de aguas que tiene lugar entre la coagulación y la filtración. Se define como la eliminación de las partículas en suspensión, flóculos químicos, precipitados y otros sólidos sedimentables por efecto de la gravedad.

1.2.5 Filtración

Después de la coagulación y sedimentación por gravedad quedan sólidos e impurezas que eliminar. Las partículas no sedimentables (alrededor del 5% de los SS) permanecen en el agua. La filtración implica la eliminación de partículas en suspensión, haciendo pasar el agua por una capa o cama de material poroso o granular. Los procesos unitarios de filtración más utilizados tiene filtros de arena y filtración por tierra de diatomeas.

1.2.6 Ablandamiento del agua

Los métodos más empleados para reducir la dureza (concentración de carbonato cálcico en el agua) del agua son la descarbonatación y el intercambio iónico.

1.2.7 Desinfección

Los procesos unitarios descritos con anterioridad consiguen una eliminación de la turbidez y los sólidos en suspensión y en parte elimina muchos microorganismos, pero no aseguran una eliminación suficiente de los virus patógenos y las bacterias. Para llegar a este punto se sigue un proceso de desinfección que destruye o inactiva los patógenos.

Los métodos de desinfección empleados pueden ser:

- Tratamiento con calor. Ebullición del agua para desinfectar.
- Tratamiento con radiación. Utilización de rayos UV para desinfectar el agua.

- Tratamientos químicos. Utilización de productos químicos para desinfectar el agua: cloro, ozono, bromo, yodo, cobre, ácidos y álcalis...

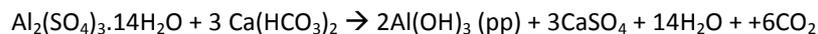
La cloración es una de las técnicas más extendidas por su efectividad y coste. Las formas en las que el cloro se emplea son cloro gaseoso (Cl_2), hipoclorito de sodio (líquido) e hipoclorito de calcio (sólido).

1.2.8 Tratamiento de lodos en plantas potabilizadoras.

En las plantas de purificación de agua se remueven sólidos suspendidos, coloidales y disueltos en el agua. Los sólidos removidos del agua cruda constituyen el residuo de la planta. La fuente de los diferentes residuos, así como sus características y cantidades, es función del tipo de tratamiento aplicado, de la composición del agua cruda y la calidad del producto (agua potable).

Los residuos generados en las plantas de purificación en las que tenemos proceso de coagulación química están constituidos básicamente por el lodo de los sedimentadores. El lodo está compuesto por los precipitados de aluminio o de hierro, provenientes del uso de alumbre o de sales de hierro como coagulantes, así como por el material orgánico e inorgánico removido, arenas, lino, arcillas, polímeros o ayudas de coagulación empleados, y por el agua de arrastre utilizada para su transporte.

Cuando empleamos sulfato de alúmina como coagulante se produce la reacción indicada a continuación, la cual indica que 1 mg/l de alumbre produce 0,26 mg/l de precipitado de aluminio como $\text{Al}(\text{OH})_3$:



Para aguas coaguladas se puede suponer que los sólidos suspendidos, medidos en mg/l, son iguales a la turbidez, y calcular la cantidad de lodo seco de la siguiente manera:

Lodo seco de alumbre= turbiedad + precipitado de aluminio

$$W = (S + 0,3D) Q \times 10^{-3} \quad \text{Ec. 63}$$

Donde W representa los kg de lodo seco de alumbre, S la turbiedad del agua cruda en NTU, D dosis de alumbre en mg/l y Q metros cúbicos de agua tratada.

El método más usado para el tratamiento de los lodos es el espesamiento. El espesamiento por gravedad reduce el exceso de agua mediante decantación y concentra los

sólidos por medio de la sedimentación. El lodo espesado se procesa adicionalmente o se dispone. El espesador permite obtener lodos con un 5% de sólidos, de manera que se concentran lodos con un 99,5 % de agua en lodos con un 95 % de humedad. El volumen del lodo se reduce en 1/10 de su volumen original, al aumentar la concentración de sólidos de 0,5 % a 5%.

Otros métodos para desaguar los lodos son las centrífugas y las prensas filtro. Mediante los filtros se pueden obtener lodos con un contenido en sólidos del 40%. El lodo es dosificado dentro de la prensa a presiones incrementales, el agua pasa a través de la tela de filtración mientras que los sólidos son retenidos.

2. DEPURADORA DE “LA ALMOZARA”

2.1 Descripción detallada del proceso de depuración en “La Almozara”.

La estación depuradora de “La Almozara” situada en el barrio zaragozano con el mismo nombre, está dimensionada para tratar los vertidos de una población aproximada de 100.000 habitantes, correspondiente a las áreas de Delicias, Químicas y el polígono industrial de la Autovía de Logroño. Al igual que todas las plantas de depuración, “La Almozara” presenta dos líneas de tratamiento, una línea de aguas y otra de fangos. Los fangos extraídos se someten a un proceso de digestión anaerobia, produciéndose una cantidad de biogás, que se emplea en la calefacción de los fangos y la producción de energía por medio de una cogeneración.

La línea de aguas, como todas las plantas de tratamiento (Ver apartado 1 del presente Anexo) incluye un pretratamiento, un tratamiento primario y un secundario (sin tratamiento avanzado). El esquema simplificado para el tratamiento de aguas se puede ver en la Ilustración 10:

- I. Predesbaste. Dentro de la etapa de predesbaste se incluye un proceso de separación de sólidos gruesos haciendo pasar el agua por un pozo de gruesos provisto de doble reja extraíble. Los sólidos de mayor tamaño son separados a un contenedor de residuos.
- II. Elevación de las aguas mediante tres tornillo Arquímedes.
- III. Desbaste. Los sólidos más grandes se elimina mediante un filtrado del agua por rejillas de diferente tamaño. Estas rejillas tiene 50 y 15 mm de luz. Los sólidos retirados con evacuados mediante cintas transportadoras hasta un compactador.

- IV. Desarenado y desengrasado. La planta dispone de dos desarenadores-desengrasadores donde se aporta aire a través de difusores porosos mediante dos soplantes. Gracias a este aire las grasas y otras materias flotantes son recogidas con rasquetas y enviadas a un separados de cadenas. Con una bomba elevadora se recoge la arena decantada y se almacena en contenedores.
- V. Decantación primaria. Los sólidos en suspensión sedimentan en dos decantadores primarios por gravedad.
- VI. Tratamiento biológico. El proceso biológico se realiza mediante fangos activos. Los reactores están equipados con 3 aireadores. El tiempo de retención es de 3 horas y la edad de los fangos de 3,6 días. Existe una recirculación de fangos para permitir la presencia continua de las colonias de microorganismos necesaria para eliminar la materia orgánica.
- VII. Decantación secundaria. Se realiza por medio de dos cubas circulares con un tiempo de retención medio de 4 horas.

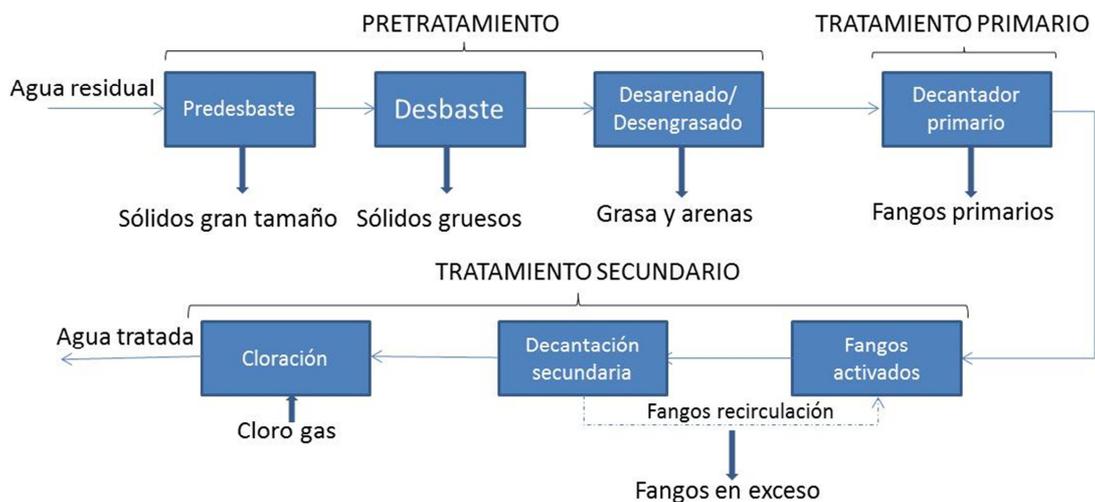


Ilustración 10. Línea de tratamiento de aguas en "La Almozara".

La línea de fangos para la reducción del volumen de los fangos generados y su estabilización, cuenta con una etapa de espesamiento, digestión anaerobia y deshidratación. La valorización de los fangos incluye el empleo del biogás generado en un motor de combustión interna. En la Ilustración 11 se puede observar un esquema simplificado de las etapas dentro de la línea de fangos.

- I. Espesamiento. Los fangos son espesados por gravedad en una cuba circular cerrada de 13 metros de 123 m^3 de almacenamiento.

- II. Acondicionamiento del fango. Los fangos se acondicionan mediante la adición de cloruro férrico para evitar la presencia de sulfuro de hidrógeno en el biogás.
- III. Tamizado de los fangos. Los fangos se tamizan mediante dos rejillas circulares autolimpiables para eliminar los productos que puedan favorecer la formación de costras en el digestor.
- IV. Digestión primaria. Los fangos se digieren en un digestor primario calorifugado de 13,1 m de altura, 20 m de diámetro y 3.850 m³. Los fangos se retienen 25 días y se elimina el 45 % de la materia volátil. La agitación y calentamiento del fango se produce mediante tres heatmix exteriores a la vasija. La calefacción se realiza mediante una camisa de aguas caliente. La temperatura a la cual se realiza la digestión es de 34°C (mesofólica).
- V. Digestión secundaria. Este digestor tiene la función mixta de apuramiento del proceso de digestión y almacenamiento del fango.
- VI. Deshidratación. Los fangos se acondicionan con polielectrolito y se deshidratan por medio del filtros banda. Su uso posterior es agrícola.
- VII. Almacenamiento del biogás. Se realiza por medio de un gasómetro de doble esfera de material plástico con capacidad para 8 horas. El biogás se puede destinar a antorcha o alimentación del MACI.
- VIII. Sistema de calorifugado del digestor. El calor necesario para calentamiento del digestor proviene del aprovechamiento de la energía térmica del MACI, aguas de refrigeración de camisas y gases de escape, para lo que se dispone de un intercambiador de calor.
- IX. Grupo motogenerador. El biogás es comprimido hasta 1,5 bar para ser introducido en el MACI. El motor de combustión interna es de 287 kWe marca Caterpillar.

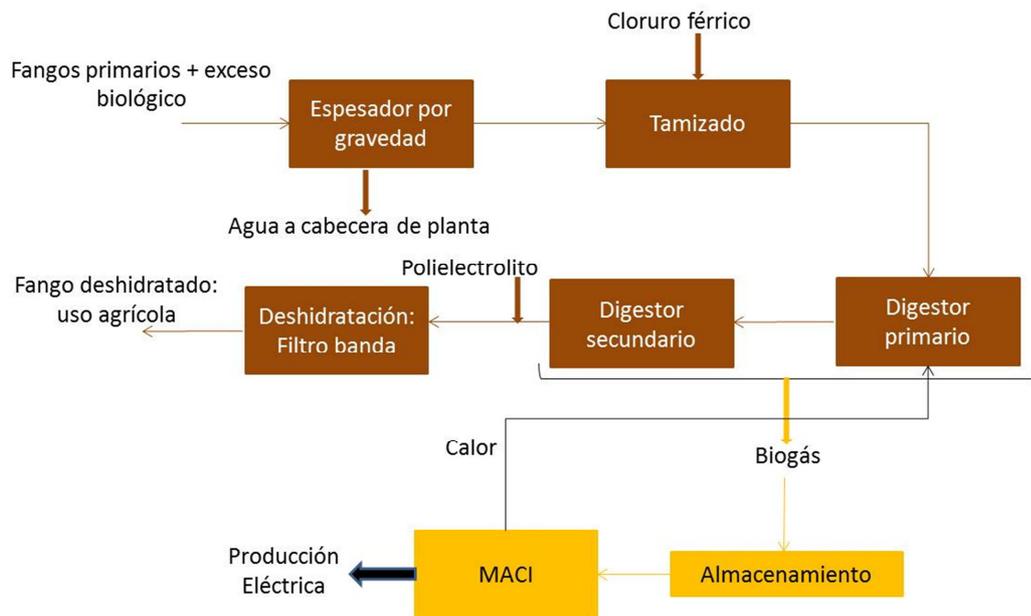


Ilustración 11. Línea de fangos en La Almozara.

2.2 Datos técnicos de la planta “La Almozara”

Los datos mensuales aportados por planta en cuanto a medida de calidad del agua a la entrada y salida del tratamiento de depuración, han sido la DQO, DBO₅, el nitrógeno total (NTK), la materia en suspensión (SS), el fósforo total (P) y la conductividad eléctrica a la entrada, así como el caudal diario en m³ de agua. Debido a cuestiones de confidencialidad, los datos de consumo energético y parámetros de calidad en las aguas de salida de depuradora no se muestran en las tablas. Para obtener los parámetros del agua a la salida del tratamiento primario, y dado que no han sido facilitados por la planta, se han supuesto unos rendimientos de eliminación de DBO, SS, NTK y P, de acuerdo con los valores presentados en la Tabla 18. La DQO se ha obtenido considerando la relación existente con la DBO para un agua después del tratamiento primario (Ver Tabla 16).

Tabla 21. Datos aportados de caudal y conductividad.

Mes	Q	Cond	C	E. comprada
	[m ³ /mes]	[microS/cm]	mg/l	kWh/mes
ene-10	841.526	1.252	801,3	d.c
feb-10	715.204	1.512	967,7	d.c
mar-10	845.493	1.494	956,2	d.c
abr-10	895.254	1.431	915,8	d.c
may-10	952.218	1.548	990,7	d.c
jun-10	989.970	1.546	989,4	d.c
jul-10	1.069.000	1.434	917,8	d.c
ago-10	1.025.000	1.568	1004	d.c
sep-10	1.006.000	1.441	922,2	d.c
oct-10	984.067	1.568	1004	d.c
nov-10	868.026	1.354	866,6	d.c
dic-10	871.011	1.341	858,2	d.c

d.c: dato confidencial.

Tabla 22. Parámetros de calidad del agua.

Mes	Entrada a planta					Tratamiento primario*					Salida de planta				
	P	NTK	DQO	DBO_5	SS	P	NTK	DQO	DBO	SS	P	NTK	DQO	DBO_5	SS
	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
ene-10	6	53,03	550	283	268	5,0	51,44	509,4	229,2	160,8	d.c	d.c	d.c	d.c	d.c
feb-10	5,1	49,3	562	249	230	4,3	47,82	448,2	201,7	138	d.c	d.c	d.c	d.c	d.c
mar-10	6,2	58,58	598	265	256	5,2	56,82	477	214,7	153,6	d.c	d.c	d.c	d.c	d.c
abr-10	5,2	41,94	458	198	233	4,4	40,68	356,4	160,4	139,8	d.c	d.c	d.c	d.c	d.c
may-10	6	44,96	464	206	236	5,0	43,61	370,8	166,9	141,6	d.c	d.c	d.c	d.c	d.c
jun-10	5,2	45,94	443	200	212	4,4	44,56	360	162	127,2	d.c	d.c	d.c	d.c	d.c
jul-10	4,7	36,98	380	167	190	3,9	35,87	300,6	135,3	114	d.c	d.c	d.c	d.c	d.c
ago-10	4	33,41	369	117	178	3,4	32,41	210,6	94,77	106,8	d.c	d.c	d.c	d.c	d.c
sep-10	5,5	39,67	477	191	242	4,6	38,48	343,8	154,7	145,2	d.c	d.c	d.c	d.c	d.c
oct-10	6,1	48,08	518	244	247	5,1	46,64	439,2	197,6	148,2	d.c	d.c	d.c	d.c	d.c
nov-10	6,9	51,36	619	250	302	5,8	49,82	450	202,5	181,2	d.c	d.c	d.c	d.c	d.c
dic-10	7,3	57,55	696	305	350	6,1	55,82	549	247,1	210	d.c	d.c	d.c	d.c	d.c

*Datos calculados no aportados por planta.

En cuanto a residuos generados, los datos que han sido facilitados por planta son los referentes a las arenas y grasas retiradas en el tratamiento primario, así como la cantidad de fangos digeridos con su sequedad. No se aportaron datos de la cantidad de fangos primarios generados, por lo que se ha estimado su cantidad en términos de materia seca según se describe Isla de Juana en [28] aplicando la siguiente expresión:

$$\frac{\text{kg sólidos}}{\text{mes}} = \frac{Q \cdot SS_e \cdot \% \text{eliminación}}{1000}$$

Donde Q es el caudal de agua a tratar en m^3/mes , SS_e es la cantidad de sólidos en suspensión a la entrada de los decantadores en mg/l (supuesto igual que en la entrada de la depuradora) y porcentaje de eliminación de sólidos en suspensión en el proceso de decantación.

Igualmente se ha determinado la cantidad de fangos a la entrada del digestor en términos de materia seca a partir de los datos de contenido en materia orgánica (volátil) para los lodos digeridos aportados por planta, 53,8 % y el contenido de materia orgánica típico en los lodos sin digerir tomado de bibliografía [29], 70%. Así, sabiendo que la materia seca de los lodos está compuesta por materia inorgánica (inerte), la cual no participa en el proceso de digestión anaerobio, y materia orgánica, se ha estimado la cantidad de materia seca alimentada al digestor con los fangos a partir del valor de materia seca en los lodos digeridos siguiendo el procedimiento descrito por Metcalf and Eddy [22]:

$$46,2\% (M.I \text{ en } f. \text{ digerido}) = \frac{0,3 \text{ kg} \cdot 100}{0,3 \text{ kg} + X \text{ kg}}$$

$$30\% (M.I \text{ en } f. \text{ no digerido}) = \frac{0,3 \text{ kg} \cdot 100}{0,3 \text{ kg} + 0,7 \text{ kg}}$$

$$X \text{ kg} (\text{cantidad de } M.O \text{ en } f. \text{ digerido}) = \frac{30 - 18,86}{46,2} = 0,349$$

De este modo sabemos que de 1 kg de fango seco sin digerir se obtiene 0,6493 kg de fango seco digerido.

El volumen de fango en metros cúbicos se puede relacionar con el contenido en masa de materia seca aplicando la siguiente expresión según el procedimiento descrito en Metcalf and Eddy [22]:

$$V (\text{m}^3) = \frac{M_{\text{dry solids}} (\text{kg})}{\rho_w \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \cdot S_{sl} \cdot P_s (\%)} \quad \text{Ec. 64}$$

Donde $M_{\text{dry solids}}$ representa la cantidad de materia seca contenida en los lodos en kg, ρ_w densidad del agua en kg/m^3 , S_{sl} gravedad específica del fango tomando el valor de 1,03 y 1,005 para el fango primario y biológico [22], respectivamente; P_s porcentaje de sólidos en el lodo, tomándose el 3,5 % en el fango primario y 0,9 % en el biológico [22].

La composición elemental y el poder calorífico del fango no han sido facilitados por planta, por lo que para poder realizar los cálculos se han tomado valores de bibliografía

referentes a fangos no digeridos y digeridos. Para el caso de los fangos secundarios, al no disponer de información en cuanto a su composición se ha supuesto una composición y PCI similar a los fangos no digeridos, mientras que para los fangos primarios se ha tomado un PCI correspondiente a fangos más arenosos, tomando un valor de 2.230 kcal/kg materia seca [29].

Tabla 23. Análisis elemental de los fangos.

b.s (%)	Fango no digerido[29]	Fango digerido[37]
C	38	30
H	3,4	4,2
N	2,9	4,8
O	24,3	8,48
S	0,1	0,82
PCI (kcal/kg)	3.966	2.424 [38]

Los compuestos químicos empleados en la línea de fangos son el cloruro férrico para la eliminación de azufre en los lodos y el polielectrolito en la etapa de deshidratación. Las cantidades empleadas en la planta corresponden con 7.000 kg/mes de cloruro férrico y 520 kg/mes de polielectrolito.

Tabla 24. Subproductos generados.

Mes	Subproductos generados en el proceso de depuración						
	Arenas	Grasas	F. Primario*	F. Mixtos*	F.Digerido	Agua en F.digerido	Seq_fd
	[kg/mes]	[kg/mes]	[kg materia seca/mes]	[kg materia seca/mes]	[kg materia seca/mes]	kg/mes	[%]
ene-10	8.270	0	90.212	117.084	76.023	324.097	19
feb-10	12.180	0	65.799	145.476	94.457	416.123	18,5
mar-10	15.872	0	86.578	187.838	121.963	492.657	19,7
abr-10	5.360	0	83.438	156.464	101.592	396.408	20,4
may-10	4.280	0	89.889	179.243	116.382	440.471	20,9
jun-10	9.880	3.770	83.949	208.221	135.198	508.602	21
jul-10	3.400	0	81.241	172.153	111.779	417.980	21,1
ago-10	5.820	0	73.043	188.411	122.335	480.304	20,3
sep-10	5.080	0	97.391	237.912	154.476	581.124	21
oct-10	10.500	0	97.226	185.039	120.146	463.088	20,6
nov-10	4.880	0	104.858	200.248	130.021	501.149	20,6
dic-10	4.900	2.100	121.942	194.369	126.204	524.331	19,4

*Datos calculados no aportados por la planta.

Referente a la etapa de valorización, disponemos de datos de biogás generado mensualmente y electricidad producida por el MACI, con la que se abastece entre un 50-80% (dato variable según el mes) de la demanda total energética en la planta depuradora. Mediante el sistema de cogeneración se puede aprovechar el calor disipado en el circuito de refrigeración y los gases de escape, calor que es empleado mediante un sistema de intercambiadores de calor para la calefacción del digestor anaerobio. Según información aportada por planta, disponen de una caldera auxiliar para la generación de agua caliente para su uso en casos puntuales de no disponer de suficiente calor en la cogeneración. No se han aportado datos relativos a consumos en dicha caldera, por lo que no se ha considerado su uso en el análisis exergético.

El calor disponible tanto en el circuito de refrigeración de las camisas como en los gases de escape se ha determinado a partir de datos del caudal y temperatura de gases de salida del motor junto con caudal y temperatura de salida del agua en el circuito de refrigeración de las camisas, para el cual se puede tener un salto térmico de temperatura de 6-8 °C (ΔT).

$$Q_{gas} (kW) = \frac{m_{gas} \left(\frac{kg}{h}\right) \cdot c_{p,gas} \left(\frac{kJ}{kgK}\right) (T_c - T_f)}{3.600} \quad \text{Ec. 65}$$

$$Q_{agua,refr.} (kW) = \frac{m_{agua} \left(\frac{m^3}{h}\right) \cdot \rho_{agua} \left(\frac{kg}{m^3}\right) c_{p,agua} \left(\frac{kJ}{kgK}\right) \cdot \Delta T}{3.600} \quad \text{Ec. 66}$$

Tabla 25. Energía eléctrica producida y biogás generado.

Mes	E. Producida	$Q_{biogás}$
	[kWh/mes]	[Nm ³ /mes]
ene-10	156.800	67.121
feb-10	148.500	61.936
mar-10	165.700	70.866
abr-10	161.200	72.030
may-10	164.000	73.036
jun-10	129.700	59.460
jul-10	115.300	55.118
ago-10	107.300	51.863
sep-10	125.743	55.620
oct-10	149.200	66.185
nov-10	162.200	70.290
dic-10	167.100	66.743

Tabla 26. Datos gases de escape y circuito de refrigeración.

Gases de escape	
Caudal gases, m_{gas} (kg/h)	1.240
Temperatura salida, T_c (°C)	485
Temperatura enfriamiento, T_f (°C)	120*
Q (kW)	147
Circuito de refrigeración de camisas (AT)	
Caudal de agua, m_{agua} (m ³ /h)	30
Temperatura salida (°C)	90
Q (kW)	207,15

*Temperatura hasta la que se pueden enfriar los gases [30].

La composición en fracciones molares de los gases de escape del motor de combustión interna no ha sido facilitada por planta, por lo que se ha realizado una estimación de está suponiendo una combustión completa para metano y un exceso de aire del 10%, según información bibliográfica [29].



De modo que la composición molar de los gases de combustión a la salida del MACI sería la que viene recogida en la siguiente tabla:

Tabla 27. Composición molar de los gases de escape.

Composición molar Gases de escape (%)	
CO ₂	9
H ₂ O	15
O ₂	1,7
N ₂	75
PM (g/mol)	28,95

Tabla 28. Datos referentes a biogás(estimación a partir de rangos aportados por la planta)

Datos biogás	
Composición volumétrica	%
CH ₄	60
H ₂ S	2
CO ₂ + H ₂ O	30
H ₂	1
CO	5
N ₂	1
O ₂	1
PCI (kcal/Nm ³)	5.020
P _{CN} (kg/m ³)	1,2
PM (g/mol)	25,5*

*Obtenido como $PM = \sum_i x_i \cdot PM_i$

3. DEPURADORA DE “LA CARTUJA”

3.1 Descripción detallada del proceso de depuración en “La Cartuja”.

La planta de tratamiento de aguas residuales de “La Cartuja” constituye la mayor instalación de tratamiento de aguas residuales en Zaragoza. Con una capacidad instalada para depurar vertidos de una población de 1,2 millones de habitantes equivalentes, procedentes del polígono industrial de Malpica, colector de los núcleos urbanos del tramo final del Huerva y obviamente el resto de la ciudad no abastecido por la depuradora de “La Almozara”. Al igual que la anterior, la planta cuenta con una línea de aguas y otra de fangos. En este caso en la línea de fangos no se realiza la digestión anaerobia sino la incineración de los mismos, aprovechándose los gases de escape para la producción de vapor, el cual es empleado en la generación eléctrica a través de un ciclo Rankine con turbina de vapor. La energía eléctrica generada de este modo abastece entre el 9-15 % del consumo total de la planta. La planta de tratamiento se encuentra cubierta y dispone de un sistema de desodorización para tratamiento del aire vía química inyectándose de nuevo a las naves. El sistema de desodorización es una parte importante de demanda energética en la planta, suponiendo alrededor del 20 % del consumo total de la planta.

La línea de tratamiento de aguas está formada por:

- I. Predesbate. Dispone de un pozo de gruesos y dos rejillas para eliminar los sólidos flotantes voluminosos.

- II. Elevación de las aguas. 5 grupos sumergidos para elevación del agua a una altura de 10 m.
- III. Desbaste. Mediante 6 rejillas de gruesos y 6 de finos.
- IV. Desarenado-desengrasado. 6 tanque rectangulares aireados por turbinas sumergidas.
- V. Decantación primaria laminar. 12 tanques dotados de tolva única y rascador de fondo.
- VI. Balsas biológicas. 3 reactores biológicos con difusores estáticos. La producción del aire necesario para el proceso se realiza mediante 4 turbocompresores operando a 1,1 bar. En estos mismos reactores se produce la eliminación del fósforo mediante adición de cloruro férrico.

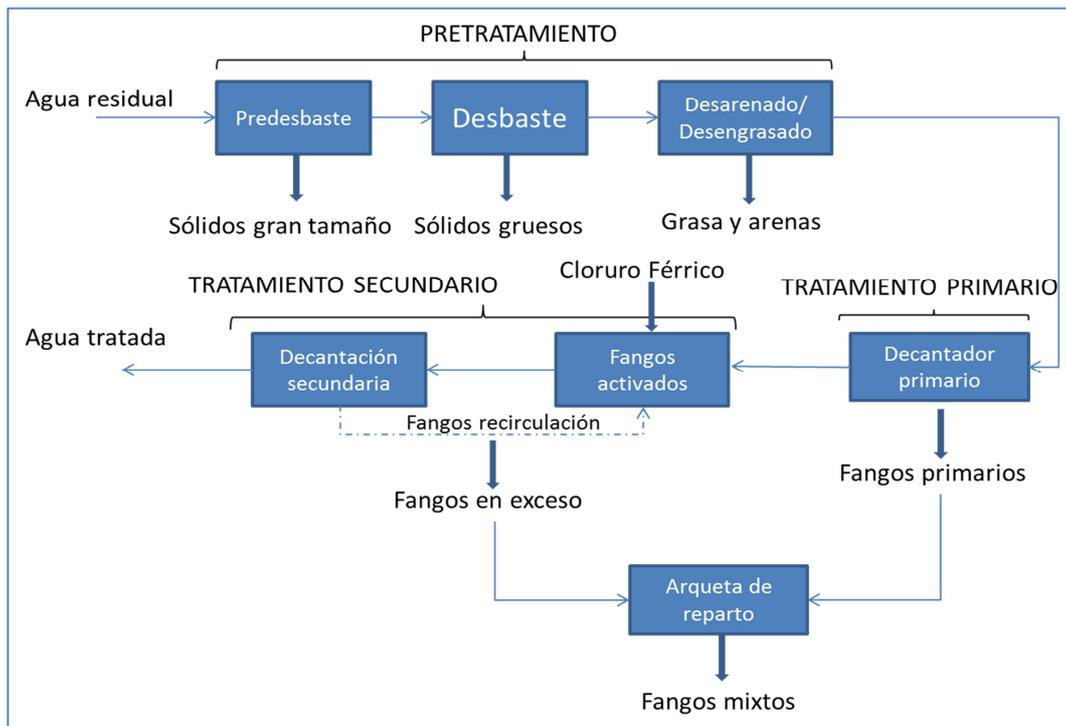


Ilustración 12. Línea de tratamiento de aguas en "La Cartuja".

Por otro lado la línea de fangos está compuesta por:

- I. Espesamiento. Espesadores por gravedad de fangos primarios y secundarios mediante 4 tanques circulares.
- II. Deshidratación. Se deshidratan los fangos mixtos mediante centrifugas de alta sequedad con acondicionamiento de polímero.

- III. Incineración de los fangos. Los fangos deshidratados son incinerados en un horno de lecho fluidizado de 6,7 m. Los humos generados son enfriados en un economizador desde los 860 °C hasta 250 °C para precalentar el aire de entrada al horno y generar vapor.
- IV. Aprovechamiento de la energía. En el economizador se genera vapor a 29 bar y 233°C de temperatura. De este vapor se realiza una extracción, reduciéndose la presión hasta los 3 bares para ser introducida en el desgasificador. El vapor restante se introduce en una turbina de vapor de doble cuerpo produciéndose energía eléctrica. El vapor de salida de la turbina se dirige a un condensador, bombeándose el agua de salida a un desgasificador. Desde la salida del desgasificador el agua es bombeada de nuevo al economizador (intercambiador de calor).

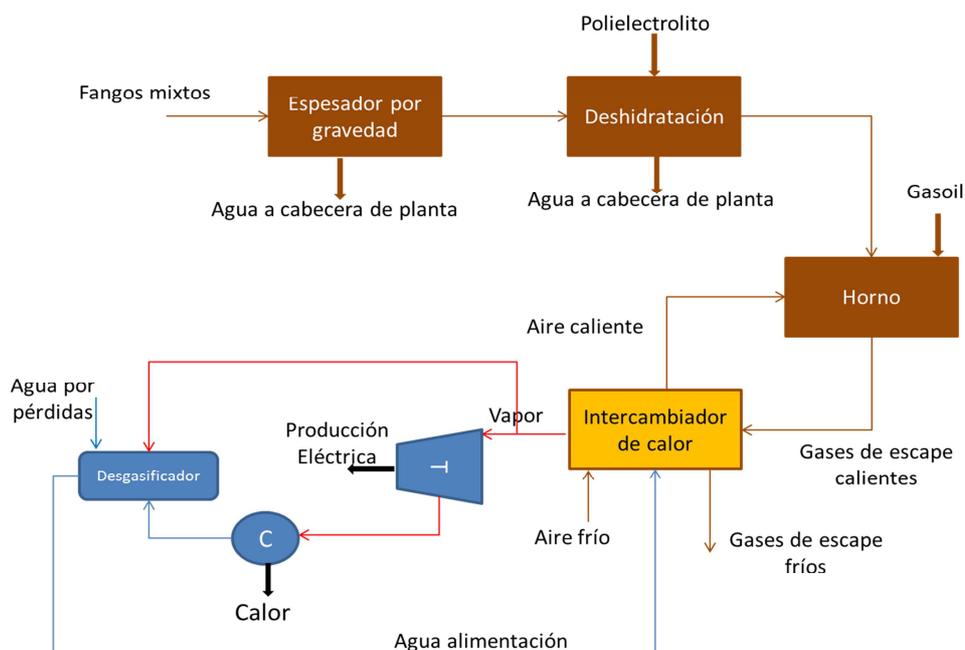


Ilustración 13. Línea de fangos en “La Cartuja”

3.2 Datos técnicos referentes a “La Cartuja”.

Los parámetros con los cuales se mide la calidad del agua son, al igual que en La Almozara, DQO, DBO₅, SS, nitrógeno total (NTK) y fósforo total, se conoce cada uno de los valores de estos en el agua de entrada a depuradora, salida de tratamiento primario y agua tratada de salida de depuradora. En el caso de la conductividad solo se conocen los valores de entrada a la planta, los cuales son mayores que en el caso de “La Almozara”, debido a la entrada

de aguas procedentes de polígonos industriales. Igualmente se dispone de datos referentes a caudales de entrada, compuestos químicos añadidos, arenas y grasas retiradas.

De la línea de fangos disponemos de datos referentes a caudal (m^3/mes) y concentración del fango generado, tanto para fangos primarios como biológicos y fangos espesados. En el caso de los fangos deshidratados (introducidos en el horno) se conoce la cantidad de materia seca con el porcentaje de sequedad al cual representa.

Para el caso de los fangos deshidratados la planta dispone de los datos correspondientes al análisis elemental en base seca y poder calorífico inferior en kcal/kg materia seca. No se dispone de composición y poder calorífico de manera individual para fangos primarios y biológicos, por lo que se procederá de igual modo que en el caso de "La Almozara", considerando una composición y PCI para los fangos biológicos similar a la aportada para los fangos deshidratados y un PCI para los fangos primarios correspondiente con fangos arenosos.

Tabla 29. Datos generales de "La Cartuja".

Mes	Q	E. comprada	C	Cond	T	FeCl ₃	Poly	Grasa	Arenas
	[m ³ /mes]	[MWh/mes]	[mg/l]	[microS/cm]	[°C]	[kg]	[kg]	[ton/mes]	[ton/mes]
ene-10	3,61E+06	d.c	1.254	1.959	16,4	394.640	9.709	8,463	46,8
feb-10	3,69E+06	d.c	1.587	2.479	16,8	378.520	10.627	7,644	22,7
mar-10	3,77E+06	d.c	1.078	1.685	16,9	449.660	13.441	8,463	77,8
abr-10	3,85E+06	d.c	1.329	2.077	18,5	446.140	12.890	8,19	53,6
may-10	3,93E+06	d.c	1.461	2.283	20	422.980	12.178	8,463	54,6
jun-10	4,01E+06	d.c	1.526	2.384	22,4	422.660	11.445	8,19	56,6
jul-10	4,10E+06	d.c	1.426	2.228	24,9	317.640	10.718	8,463	60,9
ago-10	4,18E+06	d.c	1.306	2.041	24,9	296.560	8.261	8,463	41,7
sep-10	4,26E+06	d.c	1.317	2.058	24	320.300	9.371	8,19	76,9
oct-10	4,34E+06	d.c	1.385	2.164	21,2	322.740	10.093	8,463	47,1
nov-10	4,42E+06	d.c	1.430	2.234	18,3	351.700	10.321	8,19	55,2
dic-10	4,50E+06	d.c	1.187	1.854	16,2	438.720	12.191	8,463	58,3

Tabla 30. Parámetros de calidad línea de aguas de "La Cartuja"

Mes	Entrada a planta					Tratamiento primario					Salida de planta				
	P	NTK	DQO	DBO_5	SS	SS	P	DQO	DBO_5	SS	P	NTK	DQO	DBO_5	
	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	
ene-10	7,8	51	783	343	414	272	6,8	615	231	d.c	d.c	d.c	d.c	d.c	
feb-10	8,5	51	866	387	456	271	7,5	653	278	d.c	d.c	d.c	d.c	d.c	
mar-10	8,4	56	790	351	395	292	7,7	633	282	d.c	d.c	d.c	d.c	d.c	
abr-10	7,7	49	665	307	345	259	6,7	565	237	d.c	d.c	d.c	d.c	d.c	
may-10	8,2	57	722	339	387	286	7,4	603	267	d.c	d.c	d.c	d.c	d.c	
jun-10	8,8	49	688	309	343	253	8	545	228	d.c	d.c	d.c	d.c	d.c	
jul-10	7,7	47	576	276	300	138	6,8	378	176	d.c	d.c	d.c	d.c	d.c	
ago-10	7	43	543	260	295	157	6,4	377	174	d.c	d.c	d.c	d.c	d.c	
sep-10	7,3	44	606	284	355	175	6,7	423	193	d.c	d.c	d.c	d.c	d.c	
oct-10	7,5	53	612	311	335	199	7	489	231	d.c	d.c	d.c	d.c	d.c	
nov-10	8	51	672	354	384	232	7,5	529	269	d.c	d.c	d.c	d.c	d.c	
dic-10	764	368	404	257	8,2	553	274	28	1,4	d.c	d.c	d.c	d.c	d.c	

Tabla 31. Cantidades de fangos en línea de fangos "La Cartuja".

Mes	Fangos primarios		Fangos biológicos		Fangos espesados		Fangos deshidratados	
	Q	Materia seca	Q	Materia seca	Q	Materia seca	Materia seca	Seq
	[m ³ /mes]	[ton/mes]	[m ³ /mes]	[ton/mes]	[m ³ /mes]	[ton/mes]	[ton/mes]	[%]
ene-10	384.051	921,72	159.259	789,92	29.322	1.481	1385	25,14
feb-10	336.718	774,45	139.012	674,21	24.218	1.259	1190	23,8
mar-10	486.912	1.071,21	194.331	934,73	28.954	1.697	1602	25,58
abr-10	420.865	1.094,25	213.423	973,21	32.710	1.743	1642	25,9
may-10	344.863	1.103,56	181.004	979,23	32.109	1.792	1689	26,78
jun-10	354.582	886,46	172.053	829,30	28.750	1.498	1413	25,9
jul-10	225.652	676,96	159.208	681,41	33.649	1.242	1160	25,67
ago-10	223.958	627,08	172.853	648,20	35.846	1.154	1087	26,7
sep-10	321.782	804,46	177.425	778,90	41.077	1.401	1307	26,68
oct-10	269.632	835,86	167.003	789,92	31.317	1.434	1353	26,4
nov-10	209.954	944,79	147.840	879,65	36.226	1.656	1552	25,72
dic-10	254.657	993,16	167.369	935,59	30.792	1.721	1619	25,25

Tabla 32. Análisis elemental fango deshidratado de “La Cartuja”.

Fango deshidratado		
Elementos	b.s (%)	b.h (%)
C	42,47	38,84
H	5,51	5,04
N	4,45	4,07
O	11,7	10,69
S	1,41	1,29
z	34,46	31,51
w	-	8,56
PCI (kcal/kg)	4.141	3.689

Referente al proceso de incineración los datos correspondientes a gases de combustión, aire de combustión, combustible auxiliar (gasóleo) y ciclo de potencia son los siguientes:

- ✓ Gases de combustión y aire en el horno. La temperatura de los gases a la salida del horno según dato aportado por la planta es de 860°C, el cual es enfriado en el economizador hasta 250°C. La temperatura a la cual es calentado el aire en este economizador se ha podido obtener del balance de energía.

$$\eta_{eco} = \frac{m_{vapor} \cdot \Delta h + m_{aire} \cdot c_{p,aire} \cdot (T_s - 25)}{m_{gases} \cdot c_{p,gas} \cdot (860 - 250)}$$

Siendo el calor específico a presión constante de los gases de 1,148 kJ/kg K y para el aire de 1,017 kJ/kg K.

El caudal de vapor generado es un dato aportado por la planta. En cuanto a los caudales de aire y gases generados la planta dispone de datos mensuales de aire introducido al horno, mientras que para el caso de los gases solo se dispone de datos medios de caudal, el cual está comprendido entre 25.000-30.000 Nm³/h. No obstante se ha realizado una estimación de la cantidad de aire y gases de combustión mensuales que se tendrían a partir de las composiciones elementales de los fangos y el gasoil, suponiendo un proceso de combustión completa y un exceso de aire del 30 % [29]. Del mismo modo se ha obtenido la composición del gas de combustión.

Tabla 33. Composición gases de escape del horno.

Composición molar Gases de escape (%)	
CO ₂	7
H ₂ O	24
O ₂	5
N ₂	64
NO ₂	0,2
SO ₂	0,05

Tabla 34. Caudales de aire y gases de combustión en horno.

Mes	Cálculos a partir de composición combustible			Datos aportados por planta		
	m _{aire}	m _{gases}	T _{s,aire}	m _{aire}	m _{gases}	T _{s,aire}
	[kg/mes]	[kg/mes]	K	Nm ³ /mes	Nm ³ /mes	K
ene-10	1,14E+07	1,88E+07	581,2	9,87E+06	1,86E+07	464,1
feb-10	1,05E+07	1,72E+07	453,6	9,96E+06	1,68E+07	446,7
mar-10	1,32E+07	2,16E+07	458,3	1,26E+07	1,86E+07	428,1
abr-10	1,35E+07	2,20E+07	536,2	1,16E+07	1,80E+07	435,2
may-10	1,39E+07	2,24E+07	542	1,18E+07	1,86E+07	437,6
jun-10	1,16E+07	1,89E+07	466,9	1,53E+07	1,80E+07	401,8
jul-10	9,58E+06	1,56E+07	432,4	9,98E+06	1,86E+07	462,3
ago-10	8,92E+06	1,44E+07	442,4	9,64E+06	1,86E+07	468,2
sep-10	1,07E+07	1,73E+07	443,6	1,16E+07	1,80E+07	434,4
oct-10	1,11E+07	1,80E+07	390,1	1,27E+07	1,86E+07	426,8
nov-10	1,28E+07	2,09E+07	506,1	1,14E+07	1,80E+07	436,9
dic-10	1,34E+07	2,20E+07	470,4	1,28E+07	1,86E+07	426,3

- ✓ Gasóleo. Para el combustible auxiliar se dispone de datos aportados por planta en cuanto a consumo mensual. Se ha consultado el análisis elemental.

Tabla 35. Análisis elemental gasóleo [39]

b.h (%)	Gasóleo
C	86
H	11,1
N	1
O	0
S	0,8
w	1
z	0,1
ρ (kg/m³)	0,845 [40]

Tabla 36. Consumos mensuales de gasoil.

Mes	Gasoil
	l/mes
ene-10	4.285
feb-10	46.389
mar-10	2.444
abr-10	2.978
may-10	2.564
jun-10	719
jul-10	3.634
ago-10	283
sep-10	290
oct-10	281
nov-10	4.224
dic-10	7.047

- ✓ Ciclo de potencia. El vapor generado en el economizador se emplea en un ciclo de potencia con turbina de vapor. Disponemos de datos referentes a caudales de vapor generados, mientras que el ciclo de potencia ha sido simulado a partir de datos de presión de las diversas corrientes, suponiendo un rendimiento isentrópico para la turbina y bombas de 0,7 y 0,85 respectivamente. Las propiedades termodinámicas se pueden observar en la Tabla 37. La potencia específica de turbina es de 534,6 kJ/kg, mientras que para las bombas es de 0,113 kJ/kg para la bomba 1 y 3,233 kJ/kg para la bomba 2. El calor disipado en

el condensador es de 2.023 kJ/kg. El rendimiento energético del ciclo de potencia definido como el trabajo generado entre el calor aportado es igual a:

$$\eta_{\text{ciclo}} = \frac{W_{\text{turbina}} - W_{\text{bomba1}} - W_{\text{bomba2}}}{h_1 - h_8} = 0,23$$

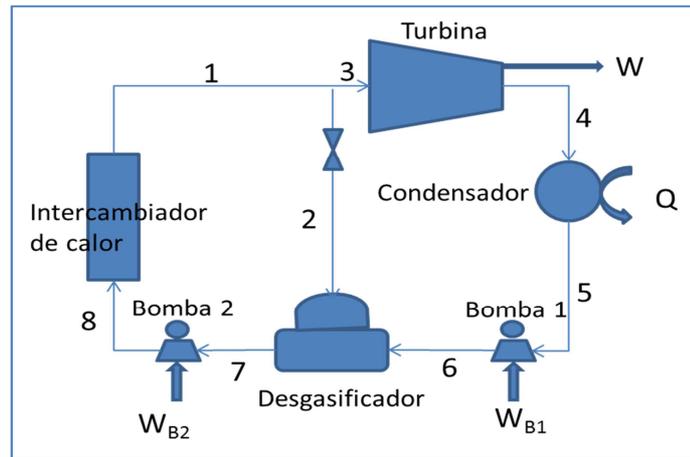


Ilustración 14. Ciclo de potencia con turbina de vapor.

Tabla 37. Propiedades termodinámicas corrientes en ciclo de potencia.

Corriente	h[i]	P[i]	T[i]	s[i]	x[i]
	kJ/kg	bar	K	kJ/kg K	
1	2809	28,63	506,2	6,215	1
2	2809	3	445,9	7,188	1
3	2809	28,63	506,2	6,215	1
4	2274	0,2	333,2	6,903	0,858
5	251,3	0,2	333,2	0,8318	0
6	251,5	1,2	333,2	0,8318	0
7	439,3	1,2	377,9	1,361	0
8	442,5	29	378,2	1,362	0

En la Tabla 38 se muestran los datos referentes a vapor total generado, vapor que se destina a la turbina y desgasificador, así como la electricidad generada (dato aportado por la planta). De la simulación del ciclo y a partir de los datos reales de caudal de vapor se ha obtenido la potencia de turbina. Estos datos se han comparado con los datos reales de potencia de turbina calculados mediante la electricidad total generada, viéndose una gran similitud entre ambos valores.

Tabla 38. Vapor generado, electricidad generada y potencia de turbina.

Mes	Vapor generado	Vapor a turbina	Vapor a desgasif.	E.Generada	P.real	P.ciclo
	ton/mes	kg/h	kg/h	MWh/mes	kW	kW
ene-10	2564	2562	884,6	236,90	318,41	377,22
feb-10	2906	3214	1110	282,60	420,54	473,42
mar-10	3645	3642	1257	236,40	317,74	536,29
abr-10	3291	3398	1173	366,40	508,89	500,39
may-10	3349	3346	1155	384,00	516,13	492,75
jun-10	3167	3270	1129	358,40	497,78	481,55
jul-10	2752	2750	949,4	284,30	382,12	404,89
ago-10	2528	2526	872,1	245,60	330,11	371,97
sep-10	3034	3132	1082	335,00	465,28	461,32
oct-10	3393	3390	1171	378,10	508,20	499,20
nov-10	3279	3385	1169	359,50	499,31	498,50
dic-10	3633	3630	1253	402,50	540,99	534,60

4. PLANTA POTABILIZADORA “CASABLANCA”.

4.1 Descripción detallada del proceso de potabilización en “Casablanca”

La planta potabilizadora de Casablanca situada en Zaragoza tiene capacidad de abastecimiento para 1,7 millones de habitantes equivalentes. El agua de entrada a la potabilizadora tiene en la actualidad tres posibles orígenes: Canal imperial de Aragón (toma de El Bocal en el Ebro, aguas debajo de Tudela), río Ebro (bombeo desde el meandro de La Almozara, justo aguas arriba de la depuradora) o del embalse de Yesa (Pirineos), a través de las infraestructuras realizadas por ACESA a partir del tramo final de la acequia de La Sora, que parte del Canal de Bardenas, y con el posible almacenamiento intermedio en el embalse de La Loteta (97 hm³). Cada una de estas aguas de origen presenta unos parámetros de calidad diferentes, con el orden Ebro < Canal < Yesa. En la Tabla 39 se recogen los valores de caudales captados aportados por la planta para los años de 2.008-2.010, por procedencia. Durante el año 2.008 las captaciones de agua se realizaron mayoritariamente del Canal Imperial, durante los años 2.009 y 2.010 ha tendido a aumentar la captación de agua del pantano de Yesa dadas sus óptimas condiciones organolépticas.

En la Ilustración 15 se puede observar un esquema simplificado de la planta potabilizadora. Como se puede observar las etapas se corresponden con las descritas en el apartado 1 para los procesos de potabilización de las aguas. El proceso comienza con una etapa

de desbaste seguida de una coagulación mediante adición de sulfato de alúmina. Una vez realizada la coagulación se produce la decantación mediante 11 decantadores que recirculan fangos, añadiendo como ayudante para la floculación polielectrolito sensiblemente ionizado. Al final de estos procesos se han eliminado un 99% de materia en suspensión, 90% de turbiedad coloidal y 60% de materia orgánica. El proceso continúa con el paso del agua a través de filtros de arena (lecho de arena de sílice). El agua así tratada se bombea a unos depósitos de almacenamiento (180.000 m³) con una cota de altura de 8,5 m superior a la cota donde se encuentra el agua filtrada. Como etapa final se realiza la desinfección dosificando hipoclorito sódico.

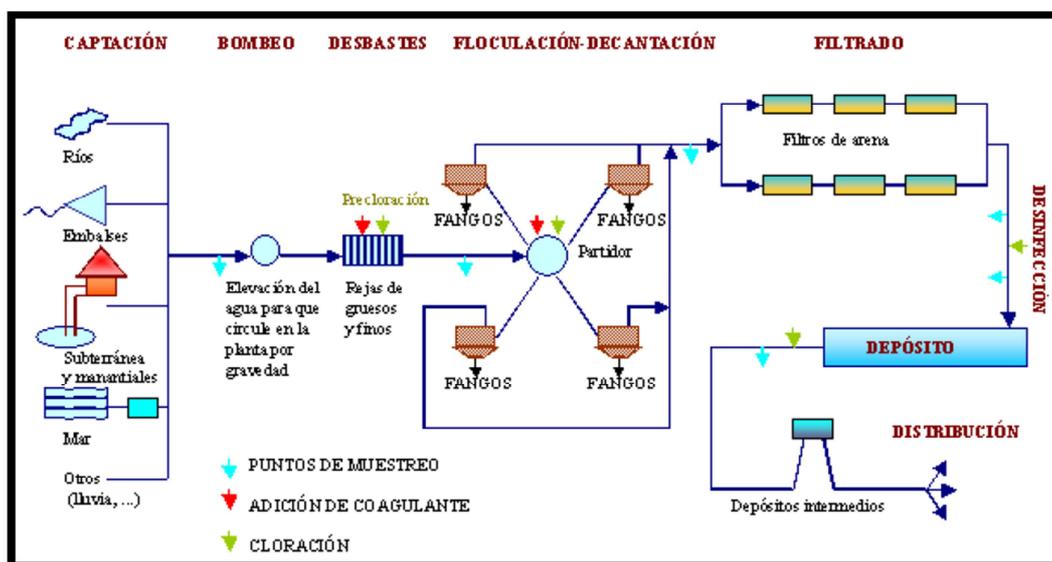


Ilustración 15. Esquema simplificado ETAP Casablanca [25].

4.2 Datos técnicos referentes a la ETAP.

Los datos aportados por la planta como medida de la calidad del agua han sido la conductividad, medida en $\mu\text{S}/\text{cm}$; turbidez a la entrada y salida de la planta, medida en NTU; y el carbono orgánico total (TOC) a la salida, medido en mg/l . Todos estos parámetros ya han sido descritos en el anexo A. Al no disponer de datos de planta para el TOC de entrada, se han consultado valores obtenidos de análisis realizados por la Confederación Hidrológica del Ebro [26] [27]. Tanto para el Canal como para el embalse de Yesa los valores de DBO dados van de 10 hasta menos de 5 mg/l . Se ha tomado el valor de 10 como medida más conservadora. A partir de este dato, y tomando las relaciones que aparecen en la Tabla 16 del Anexo A, se ha obtenido el valor de TOC para la entrada a la planta para una relación BOD/TOC de 1,6.

$$\frac{BOD}{TOC} = 1,6.$$

Tabla 39. Caudales captados en Casablanca por procedencia y año.

	2.008			2.009			2.010		
	Ebro	Yesa	Canal	Ebro	Yesa	Canal	Ebro	Yesa	Canal
dic	0	0	4.980.813	0	1.302.010	3.596.589	0	3.329.800	1.608.114
nov	1.478.221	847.151	2.390.463	777.179	1.638.500	2.356.064	0	4.188.622	687.083
oct	132.426	128.209	4.821.485	0	1.959.581	3.195.544	0	4.196.393	904.146
sep	0	0	5.236.313	0	2.606.679	2.241.903	0	4.459.690	641.959
ago	0	0	5.183.000	0	2.632.000	2.271.591	0	4.766.543	283.579
jul	0	0	5.639.192	0	2.728.010	2.610.264	0	4.611.071	862.333
jun	0	454.415	4.679.134	0	790.000	4.639.364	0	3.214.800	2.225.761
may	0	0	4.947.973	0	0	5.214.188	0	2.787.350	2.575.057
abr	99.763	26.193	4.823.336	0	0	4.599.248	0	2.859.841	2.082.992
mar	0	0	4.982.997	0	0	5.075.639	0	1.525.479	3.432.451
feb	3.163.473	35.223	1.735.188	856.946	0	3.737.272	1.088.029	1.193.820	2.303.005
ene	0	0	5.303.833	0	0	5.074.073	0	1.511.860	3.610.069

Otros datos aportados han sido, a parte de los ya mencionados de calidad del agua y caudales captados, las cantidades de sulfato de alúmina e hipoclorito sódico empleados mensualmente, consumos eléctricos mensuales, cantidades de fango generado (tanto seco como húmedo), así como la cantidad de agua que sale de la potabilizadora. Todos los datos detallados se pueden consultar en la Tabla 40.

Tabla 40. Caudales, parámetros de media de calidad del agua, compuestos químicos y fangos en ETAP.

Parámetro	Q _p	Q _s	Q _e	CE	C*	Cond	m _{alum}	Ratio Alum	m _{clo}	TOC _s	Turb _s	Turb _e	Fangos secos	Fangos totales
Unidades	[m ³ /mes]	[m ³ /mes]	[m ³ /mes]	[kWh/mes]	ppm	[ms/cm]	[kg/mes]	kg/m ³	[kg/mes]	[mg/l]	[NTU]	[NTU]	[ton/mes]	[ton/mes]
dic-09	21.767	4.896.000	4.918.000	502.884	530,70	829,20	334.520	0,068	103.200	2,20	0,31	14,30	141,30	613,90
nov-09	1.630	4.797.000	4.799.000	497.338	585,30	914,50	381.120	0,079	103.560	1,98	0,16	54,70	297,50	1.025,40
oct-09	1.207	5.178.000	5.177.000	478.014	518,60	810,30	381.380	0,074	129.080	1,34	0,10	27,10	212,30	702,20
sep-09	4.455	4.864.000	4.869.000	474.681	365,60	571,20	327.260	0,067	128.740	1,82	0,21	30,00	238,10	710,50
ago-09	1.618	4.922.000	4.923.000	487.506	377,70	590,20	277.420	0,056	129.060	1,95	0,22	33,00	216,10	651,90
jul-09	23.983	5.336.000	5.360.000	514.181	393,20	614,40	352.920	0,066	128.500	1,85	0,24	36,20	287,00	833,00
jun-09	8.112	5.444.000	5.452.000	521.986	596,00	931,20	453.420	0,083	232.280	1,93	0,31	53,60	453,60	1.273,50
may-09	3.462	5.229.000	5.233.000	494.652	477,40	746,00	401.280	0,077	154.940	2,33	0,35	43,70	322,70	1.174,30
abr-09	38.701	4.580.000	4.619.000	452.284	485,10	757,90	378.200	0,082	129.060	2,34	0,21	36,00	253,90	871,40
mar-09	22.518	5.073.000	5.095.000	486.403	425,70	665,20	353.200	0,069	102.960	2,15	0,16	32,00	261,40	957,00
feb-09	31.031	4.578.000	4.609.000	453.953	392,80	613,70	401.880	0,087	103.100	2,13	0,23	60,80	387,80	1.212,60
ene-09	70.121	5.019.000	5.089.000	491.322	516,70	807,40	0	0,000	129.260	2,01	0,31	25,20	191,00	762,30
dic-08	45.208	4.953.000	4.998.000	498.455	439,60	686,90	354.600	0,071	103.580	2,07	0,23	39,10	259,30	947,40
nov-08	50.549	4.687.000	4.738.000	520.659	540,80	845,00	406.900	0,086	128.080	1,32	0,20	62,80	328,40	1.123,40
oct-08	7.904	5.097.000	5.105.000	492.248	731,80	1.144,00	509.920	0,100	153.480	1,38	0,23	46,20	419,00	1.256,00
sep-08	7.964	5.267.000	5.259.000	485.886	603,40	942,80	634.650	0,121	203.700	1,80	0,27	27,90	289,10	1.077,50
ago-08	25.451	5.177.000	5.203.000	515.587	628,00	981,20	507.840	0,098	189.920	1,52	0,10	57,40	463,90	1.317,30
jul-08	27.837	5.632.000	5.660.000	539.089	711,50	1.112,00	661.270	0,117	205.500	1,86	0,13	81,10	782,10	2.011,10
jun-08	51.479	5.098.000	5.150.000	489.073	482,00	753,10	483.160	0,094	155.140	2,35	0,19	102,00	544,60	1.415,40
may-08	14.129	4.951.000	4.965.000	467.881	458,40	716,20	822.080	0,166	153.880	1,30	0,21	59,80	498,80	1.535,70
abr-08	20.778	4.942.000	4.963.000	464.887	386,20	603,50	825.870	0,166	127.800	1,73	0,31	50,20	369,10	1.212,10
mar-08	11.625	4.987.000	4.998.000	489.011	542,60	847,80	641.680	0,128	152.780	2,00	0,40	46,60	343,60	1.419,30
feb-08	156	4.949.000	4.949.000	455.130	824,70	1.289,00	517.730	0,105	153.820	2,00	0,32	35,50	411,10	1.162,80
may-10	18.353	5.358.000	5.376.000	469.524	398,20	622,20	363.580	0,068	100.040	1,18	0,14	31,10	164,40	701,60
abr-10	13.195	4.943.000	4.956.000	443.130	398,30	622,30	310.800	0,063	77.360	1,24	0,17	18,30	164,60	705,80
mar-10	2.010	4.971.000	4.973.000	483.818	424,90	663,90	363.380	0,073	101.160	1,41	0,27	17,60	172,70	851,40
feb-10	13.625	4.587.000	4.600.000	454.816	417,30	652,00	310.960	0,068	5.136	1,84	0,24	26,80	167,80	675,10
ene-10	33.020	5.107.000	5.140.000	516.704	381,60	596,20	284.680	0,055	101.960	1,75	0,22	22,00	156,10	626,70

*Dato determinado a partir de la conductividad aplicando la ecuación 62.

ANEXO C. RESULTADOS DETALLADOS.**1. Resultados detallados “Casablanca”.****Tabla 41. Exergía específica y total en “Casablanca”**

Mes	Exergías específicas							Exergías de entrada a planta (Fuel)				Exergías de salida		
	$b_{are,e}$	$b_{are,s}$	$b_{mo,e}$	$b_{mo,s}$	b_{IM}	$b_{Al2(SO3)4}$	b_{NaClO}	$B_{w,e}$	B_{NaClO}	$B_{Al2(SO3)4}$	B_{EC}	$B_{w,s}$	$B_{w,p}$	B_{fango}
	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ	kJ	kJ	kJ	kJ	kJ	kJ
dic-09	2,5E-05	5,5E-07	2,8E-01	9,9E-02	2,63	6,9E-02	4,8E-02	1,4E+10	2,4E+08	3,4E+08	1,8E+09	1,3E+10	5,9E+07	9,1E+08
nov-09	9,7E-05	2,8E-07	2,8E-01	8,9E-02	2,61	8,0E-02	4,9E-02	1,4E+10	2,4E+08	3,8E+08	1,8E+09	1,3E+10	4,4E+06	9,4E+08
oct-09	4,8E-05	1,8E-07	2,8E-01	6,0E-02	2,63	7,4E-02	5,7E-02	1,5E+10	3,0E+08	3,8E+08	1,7E+09	1,4E+10	3,2E+06	1,2E+09
sep-09	5,3E-05	3,7E-07	2,8E-01	8,2E-02	2,68	6,8E-02	6,1E-02	1,4E+10	2,9E+08	3,3E+08	1,7E+09	1,3E+10	1,2E+07	9,9E+08
ago-09	5,9E-05	3,9E-07	2,8E-01	8,8E-02	2,67	5,7E-02	6,0E-02	1,4E+10	3,0E+08	2,8E+08	1,8E+09	1,4E+10	4,5E+06	9,7E+08
jul-09	6,4E-05	4,3E-07	2,8E-01	8,4E-02	2,67	6,7E-02	5,5E-02	1,6E+10	2,9E+08	3,6E+08	1,9E+09	1,5E+10	6,6E+07	1,1E+09
jun-09	9,6E-05	5,5E-07	2,8E-01	8,7E-02	2,61	8,4E-02	9,8E-02	1,6E+10	5,3E+08	4,6E+08	1,9E+09	1,5E+10	2,2E+07	1,1E+09
may-09	7,8E-05	6,2E-07	2,8E-01	1,1E-01	2,64	7,8E-02	6,8E-02	1,5E+10	3,5E+08	4,0E+08	1,8E+09	1,4E+10	9,5E+06	9,5E+08
abr-09	6,4E-05	3,7E-07	2,8E-01	1,1E-01	2,64	8,3E-02	6,4E-02	1,3E+10	3,0E+08	3,8E+08	1,6E+09	1,3E+10	1,1E+08	8,3E+08
mar-09	5,7E-05	2,8E-07	2,8E-01	9,7E-02	2,66	7,0E-02	4,6E-02	1,5E+10	2,4E+08	3,6E+08	1,8E+09	1,4E+10	6,2E+07	9,6E+08
feb-09	1,1E-04	4,1E-07	2,8E-01	9,6E-02	2,67	8,8E-02	5,1E-02	1,4E+10	2,4E+08	4,0E+08	1,6E+09	1,3E+10	8,6E+07	8,7E+08
ene-09	4,5E-05	5,5E-07	2,8E-01	9,1E-02	2,63	0,0E+00	5,8E-02	1,5E+10	3,0E+08	0,0E+00	1,8E+09	1,4E+10	1,9E+08	9,6E+08
dic-08	7,0E-05	4,1E-07	2,8E-01	9,3E-02	2,65	7,2E-02	4,8E-02	1,5E+10	2,4E+08	3,6E+08	1,8E+09	1,4E+10	1,2E+08	9,5E+08
nov-08	1,1E-04	3,6E-07	2,8E-01	6,0E-02	2,62	8,7E-02	6,2E-02	1,4E+10	2,9E+08	4,1E+08	1,9E+09	1,3E+10	1,4E+08	1,1E+09
oct-08	8,2E-05	4,1E-07	2,8E-01	6,2E-02	2,57	1,0E-01	6,9E-02	1,5E+10	3,5E+08	5,1E+08	1,8E+09	1,3E+10	2,1E+07	1,1E+09
sep-08	5,0E-05	4,8E-07	2,8E-01	8,1E-02	2,60	1,2E-01	8,9E-02	1,5E+10	4,7E+08	6,4E+08	1,7E+09	1,4E+10	2,1E+07	1,1E+09
ago-08	1,0E-04	1,8E-07	2,8E-01	6,9E-02	2,60	9,9E-02	8,4E-02	1,5E+10	4,3E+08	5,1E+08	1,9E+09	1,4E+10	6,8E+07	1,1E+09
jul-08	1,4E-04	2,3E-07	2,8E-01	8,4E-02	2,57	1,2E-01	8,3E-02	1,6E+10	4,7E+08	6,7E+08	1,9E+09	1,5E+10	7,4E+07	1,2E+09
jun-08	1,8E-04	3,4E-07	2,8E-01	1,1E-01	2,64	9,5E-02	6,9E-02	1,5E+10	3,5E+08	4,9E+08	1,8E+09	1,4E+10	1,4E+08	9,2E+08
may-08	1,1E-04	3,7E-07	2,8E-01	5,9E-02	2,65	1,7E-01	7,1E-02	1,4E+10	3,5E+08	8,3E+08	1,7E+09	1,3E+10	3,8E+07	1,2E+09
abr-08	8,9E-05	5,5E-07	2,8E-01	7,8E-02	2,67	1,7E-01	5,9E-02	1,5E+10	2,9E+08	8,3E+08	1,7E+09	1,4E+10	5,7E+07	1,1E+09
mar-08	8,3E-05	7,1E-07	2,8E-01	9,0E-02	2,62	1,3E-01	7,0E-02	1,4E+10	3,5E+08	6,5E+08	1,8E+09	1,3E+10	3,1E+07	9,9E+08
feb-08	6,3E-05	5,7E-07	2,8E-01	9,0E-02	2,54	1,1E-01	7,1E-02	1,4E+10	3,5E+08	5,2E+08	1,6E+09	1,3E+10	4,1E+05	9,8E+08
may-10	5,5E-05	2,5E-07	2,8E-01	5,3E-02	2,67	6,8E-02	4,3E-02	1,6E+10	2,3E+08	3,7E+08	1,7E+09	1,5E+10	5,0E+07	1,2E+09
abr-10	3,3E-05	3,0E-07	2,8E-01	5,6E-02	2,67	6,3E-02	3,6E-02	1,5E+10	1,8E+08	3,1E+08	1,6E+09	1,3E+10	3,6E+07	1,1E+09
mar-10	3,1E-05	4,8E-07	2,8E-01	6,4E-02	2,66	7,4E-02	4,7E-02	1,5E+10	2,3E+08	3,7E+08	1,7E+09	1,3E+10	5,5E+06	1,1E+09
feb-10	4,8E-05	4,3E-07	2,8E-01	8,3E-02	2,66	6,8E-02	2,6E-03	1,3E+10	1,2E+07	3,1E+08	1,6E+09	1,3E+10	3,7E+07	9,3E+08
ene-10	3,9E-05	3,9E-07	2,8E-01	7,9E-02	2,67	5,6E-02	4,6E-02	1,5E+10	2,3E+08	2,9E+08	1,9E+09	1,4E+10	9,1E+07	1,1E+09

Tabla 42. Índices exergéticos en “Casablanca”

Mes	K_{prod}	η_{prod}	K_{proc}	η_{proc}	$\eta_{\text{elim, res}}$
dic-09	1,251	0,799	1,166	0,858	0,05
nov-09	1,259	0,795	1,172	0,853	0,06
oct-09	1,255	0,797	1,157	0,864	0,07
sep-09	1,248	0,801	1,161	0,861	0,06
ago-09	1,243	0,805	1,159	0,863	0,06
jul-09	1,248	0,801	1,158	0,864	0,06
jun-09	1,271	0,787	1,181	0,847	0,06
may-09	1,243	0,805	1,165	0,858	0,05
abr-09	1,258	0,795	1,170	0,855	0,05
mar-09	1,240	0,806	1,156	0,865	0,06
feb-09	1,255	0,797	1,166	0,858	0,06
ene-09	1,237	0,809	1,141	0,877	0,06
dic-08	1,254	0,797	1,162	0,860	0,06
nov-08	1,300	0,769	1,187	0,843	0,07
oct-08	1,283	0,780	1,179	0,848	0,07
sep-08	1,276	0,784	1,182	0,846	0,06
ago-08	1,289	0,776	1,186	0,843	0,06
jul-08	1,287	0,777	1,189	0,841	0,06
jun-08	1,262	0,793	1,172	0,853	0,05
may-08	1,301	0,769	1,194	0,838	0,07
abr-08	1,286	0,778	1,188	0,842	0,06
mar-08	1,278	0,783	1,188	0,842	0,06
feb-08	1,266	0,790	1,178	0,849	0,06
may-10	1,245	0,803	1,143	0,875	0,07
abr-10	1,241	0,806	1,142	0,876	0,07
mar-10	1,254	0,797	1,159	0,863	0,07
feb-10	1,232	0,812	1,144	0,874	0,06
ene-10	1,251	0,800	1,156	0,865	0,06

2. Resultados detallados “La Almozara”.

Tabla 43. Exergías específicas y totales para los flujos de agua en “La Almozara”

Mes	Agua residual de entrada					Agua salida primario					Agua tratada de salida				
	b_{IM}	b_{are}	b_{NP}	b_{MO}	$B_{w,e}$	b_{IM}	b_{are}	b_{NP}	b_{MO}	$B_{w,1}$	b_{IM}	b_{are}	b_{NP}	b_{MO}	$B_{w,s}$
	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ
ene-10	2,55	3,67E-03	0,96	7,50	9,25E+09	2,55	2,20E-03	0,93	6,94	8,76E+09	2,55	3,01E-04	0,70	0,72	3,33E+09
feb-10	2,51	3,15E-03	0,89	7,66	7,90E+09	2,51	1,89E-03	0,86	6,11	6,77E+09	2,51	2,74E-04	0,65	0,79	2,82E+09
mar-10	2,51	3,50E-03	1,06	8,15	9,89E+09	2,51	2,10E-03	1,03	6,50	8,47E+09	2,51	2,60E-04	0,69	0,78	3,35E+09
abr-10	2,52	3,19E-03	0,76	6,25	8,51E+09	2,52	1,91E-03	0,74	4,86	7,25E+09	2,52	1,92E-04	0,68	0,63	3,42E+09
may-10	2,50	3,23E-03	0,82	6,33	9,16E+09	2,50	1,94E-03	0,79	5,06	7,93E+09	2,50	2,05E-04	0,62	0,65	3,59E+09
jun-10	2,50	2,90E-03	0,83	6,05	9,26E+09	2,50	1,74E-03	0,81	4,91	8,11E+09	2,50	2,88E-04	0,59	0,75	3,79E+09
jul-10	2,52	2,61E-03	0,67	5,19	8,93E+09	2,52	1,56E-03	0,65	4,11	7,75E+09	2,52	2,06E-04	0,45	0,52	3,71E+09
ago-10	2,50	2,44E-03	0,61	5,04	8,32E+09	2,50	1,46E-03	0,59	2,88	6,09E+09	2,50	1,65E-04	0,41	0,49	3,47E+09
sep-10	2,52	3,32E-03	0,72	6,52	9,78E+09	2,52	1,99E-03	0,70	4,70	7,93E+09	2,52	2,33E-04	0,54	0,64	3,71E+09
oct-10	2,50	3,38E-03	0,87	7,07	1,02E+10	2,50	2,03E-03	0,85	5,99	9,16E+09	2,50	3,15E-04	0,64	0,98	4,04E+09
nov-10	2,53	4,13E-03	0,93	8,44	1,03E+10	2,53	2,48E-03	0,90	6,14	8,29E+09	2,53	3,28E-04	0,75	0,95	3,67E+09
dic-10	2,54	4,79E-03	1,05	9,48	1,14E+10	2,54	2,87E-03	1,01	7,48	9,59E+09	2,54	3,28E-04	0,76	0,90	3,65E+09
Total					1,13E+11					9,61E+10					4,26E+10

Tabla 44. Exergías específicas y totales compuestos químicos y subproductos en “La Almozara”

Mes	Compuestos químicos (C.Q)				Subproductos obtenidos línea de aguas							
	b_{Cl3Fe}	B_{Cl3Fe}	b_{poly}	B_{poly}	$b_{are,rec}$	$B_{are,rec}$	b_{grasas}	B_{grasas}	b_{fango2}	B_{fango2}	b_{fango1}	B_{fango1}
	[kJ/kg]	kJ	[kJ/kg]	kJ	[kJ/kg]	kJ	[kJ/kg]	kJ	[kJ/kg]	kJ	[kJ/kg]	kJ
ene-10	0,012	9,84E+06	0,030	2,56E+07	1,34E-04	1,13E+05	0,00E+00	0,00E+00	0,59	4,92E+08	1,11	9,29E+08
feb-10	0,014	9,84E+06	0,030	2,17E+07	2,33E-04	1,66E+05	0,00E+00	0,00E+00	2,04	1,46E+09	0,95	6,78E+08
mar-10	0,012	9,85E+06	0,030	2,57E+07	2,57E-04	2,17E+05	0,00E+00	0,00E+00	2,20	1,85E+09	1,06	8,92E+08
abr-10	0,011	9,84E+06	0,030	2,72E+07	8,19E-05	7,31E+04	0,00E+00	0,00E+00	1,50	1,34E+09	0,96	8,59E+08
may-10	0,010	9,84E+06	0,030	2,89E+07	6,15E-05	5,84E+04	0,00E+00	0,00E+00	1,72	1,64E+09	0,97	9,26E+08
jun-10	0,010	9,84E+06	0,031	3,01E+07	1,37E-04	1,35E+05	1,61E-04	1,58E+05	2,31	2,28E+09	0,88	8,64E+08
jul-10	0,009	9,84E+06	0,031	3,25E+07	4,36E-05	4,64E+04	0,00E+00	0,00E+00	1,57	1,67E+09	0,79	8,36E+08
ago-10	0,010	9,84E+06	0,031	3,12E+07	7,78E-05	7,94E+04	0,00E+00	0,00E+00	2,07	2,11E+09	0,74	7,51E+08
sep-10	0,010	9,84E+06	0,031	3,06E+07	6,92E-05	6,93E+04	0,00E+00	0,00E+00	2,57	2,57E+09	1,00	1,00E+09
oct-10	0,010	9,85E+06	0,031	2,99E+07	1,46E-04	1,43E+05	0,00E+00	0,00E+00	1,64	1,61E+09	1,02	1,00E+09
nov-10	0,011	9,84E+06	0,030	2,64E+07	7,69E-05	6,66E+04	0,00E+00	0,00E+00	2,02	1,75E+09	1,25	1,08E+09
dic-10	0,011	9,84E+06	0,030	2,65E+07	7,69E-05	6,69E+04	1,02E-04	8,82E+04	1,53	1,33E+09	1,44	1,26E+09
Total		1,18E+08		3,36E+08		1,23E+06		2,47E+05		2,01E+10		1,11E+10

Tabla 45. Exergías totales en etapa de valorización energética de “La Almozara”

Mes	B_{biogas}	$B_{\text{gases cal}}$	$B_{\text{gases frio}}$	$B_{\text{agua,s}}$	$B_{\text{agua,e}}$	B_{elect}
	kJ	kJ	kJ	kJ	kJ	kJ
ene-10	1,69E+09	2,63E+08	7,70E+07	6,46E+08	5,46E+08	5,64E+08
feb-10	1,56E+09	2,38E+08	6,96E+07	5,84E+08	4,93E+08	5,35E+08
mar-10	1,79E+09	2,63E+08	7,70E+07	6,46E+08	5,46E+08	5,97E+08
abr-10	1,82E+09	2,55E+08	7,46E+07	6,25E+08	5,28E+08	5,80E+08
may-10	1,84E+09	2,63E+08	7,70E+07	6,46E+08	5,46E+08	5,90E+08
jun-10	1,50E+09	2,55E+08	7,46E+07	6,25E+08	5,28E+08	4,67E+08
jul-10	1,39E+09	2,63E+08	7,70E+07	6,46E+08	5,46E+08	4,15E+08
ago-10	1,31E+09	2,63E+08	7,70E+07	6,46E+08	5,46E+08	3,86E+08
sep-10	1,40E+09	2,55E+08	7,46E+07	6,25E+08	5,28E+08	4,53E+08
oct-10	1,67E+09	2,63E+08	7,70E+07	6,46E+08	5,46E+08	5,37E+08
nov-10	1,77E+09	2,55E+08	7,46E+07	6,25E+08	5,28E+08	5,84E+08
dic-10	1,68E+09	2,63E+08	7,70E+07	6,46E+08	5,46E+08	6,02E+08
Total	1,94E+10	3,10E+09	9,07E+08	7,61E+09	6,43E+09	6,31E+09

Tabla 46. Índices exergético en “La Almozara”

Mes	Proceso global				
	k_{prod}	η_{prod}	k_{proc}	η_{proc}	$\eta_{\text{elim,res}}$
ene-10	2,562	0,390	2,005	0,499	0,152
feb-10	2,563	0,390	1,829	0,547	0,267
mar-10	2,702	0,370	1,877	0,533	0,274
abr-10	2,315	0,432	1,700	0,588	0,255
may-10	2,381	0,420	1,705	0,587	0,276
jun-10	2,363	0,423	1,628	0,614	0,331
jul-10	2,351	0,425	1,698	0,589	0,273
ago-10	2,355	0,425	1,623	0,616	0,334
sep-10	2,530	0,395	1,656	0,604	0,358
oct-10	2,407	0,416	1,752	0,571	0,251
nov-10	2,602	0,384	1,813	0,552	0,271
dic-10	2,864	0,349	2,013	0,497	0,225
Total	2,721	0,368	1,979	0,505	2,721

Tabla 47. Coste y eficiencia exergética tratamiento primario y secundario en “La Almozara”

Mes	Tratamiento primario				Tratamiento secundario			
	k_{prod}	η_{prod}	k_{proc}	η_{proc}	k_{prod}	η_{prod}	k_{proc}	η_{proc}
ene-10	1,061	0,942	0,960	1,042	2,645	0,378	1,939	0,516
feb-10	1,173	0,853	1,066	0,938	2,422	0,413	1,421	0,704
mar-10	1,174	0,852	1,062	0,942	2,546	0,393	1,447	0,691
abr-10	1,180	0,848	1,055	0,948	2,136	0,468	1,347	0,743
may-10	1,162	0,861	1,040	0,961	2,230	0,448	1,346	0,743
jun-10	1,153	0,867	1,042	0,959	2,174	0,460	1,223	0,818
jul-10	1,166	0,858	1,052	0,950	2,125	0,471	1,308	0,764
ago-10	1,384	0,723	1,232	0,812	1,798	0,556	1,011	0,989
sep-10	1,244	0,804	1,104	0,906	2,169	0,461	1,139	0,878
oct-10	1,126	0,889	1,015	0,986	2,288	0,437	1,438	0,695
nov-10	1,250	0,800	1,106	0,905	2,275	0,440	1,334	0,749
dic-10	1,191	0,840	1,053	0,950	2,650	0,377	1,624	0,616
Total	1,183	0,840	1,061	0,943	2,283	0,438	1,364	0,733

Tabla 48. Coste y eficiencia exergética en etapa de tratamiento y valorización de fangos “La Almozara”

Mes	Línea de fangos							
	Tratamiento de fango				Valorización energética: cogeneración			
	k_{prod}	η_{prod}	k_{proc}	η_{proc}	k_{prod}	η_{prod}	k_{proc}	η_{proc}
ene-10	1,451	0,689	0,963	1,038	2,999	0,333	1,989	0,503
feb-10	1,886	0,530	1,121	0,892	2,922	0,342	1,968	0,508
mar-10	2,100	0,476	1,187	0,842	2,996	0,334	2,024	0,494
abr-10	1,745	0,573	1,070	0,934	3,130	0,319	2,118	0,472
may-10	1,954	0,512	1,141	0,876	3,120	0,321	2,100	0,476
jun-10	2,773	0,361	1,375	0,727	3,211	0,311	2,015	0,496
jul-10	2,528	0,396	1,326	0,754	3,349	0,299	1,981	0,505
ago-10	2,911	0,344	1,418	0,705	3,386	0,295	1,944	0,514
sep-10	3,345	0,299	1,493	0,670	3,098	0,323	1,921	0,520
oct-10	2,228	0,449	1,230	0,813	3,107	0,322	2,026	0,494
nov-10	2,240	0,446	1,227	0,815	3,036	0,329	2,058	0,486
dic-10	2,304	0,434	1,249	0,801	2,798	0,357	1,895	0,528
Total	2,248	0,445	1,236	0,809	3,078	0,325	2,006	0,499

3. Resultados detallados “La Cartuja”.

Tabla 49. Exergías específicas y totales flujos de agua en “La Cartuja”

Mes	Agua residual de entrada					Agua salida primario					Agua tratada de salida				
	b_{IM}	b_{are}	b_{NP}	b_{MO}	$B_{w,e}$	b_{IM}	b_{are}	b_{NP}	b_{MO}	$B_{w,1}$	b_{IM}	b_{are}	b_{NP}	b_{MO}	$B_{w,s}$
	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ
ene-10	2,44	5,66E-03	0,93	10,67	5,06E+10	2,44	3,72E-03	0,90	8,38	4,22E+10	2,44	3,01E-04	0,70	1,01	1,49E+10
feb-10	2,36	6,23E-03	0,93	11,80	5,56E+10	2,36	3,70E-03	0,90	8,90	4,48E+10	2,36	1,78E-04	0,74	0,86	1,46E+10
mar-10	2,48	5,40E-03	1,02	10,77	5,37E+10	2,48	3,99E-03	0,99	8,63	4,55E+10	2,48	2,87E-04	0,63	1,04	1,56E+10
abr-10	2,42	4,72E-03	0,89	9,06	4,76E+10	2,42	3,54E-03	0,87	7,70	4,22E+10	2,42	2,87E-04	0,57	1,00	1,53E+10
may-10	2,39	5,30E-03	1,04	9,85	5,21E+10	2,39	3,91E-03	1,01	8,22	4,56E+10	2,39	3,42E-04	0,65	1,08	1,61E+10
jun-10	2,37	4,70E-03	0,90	9,39	5,07E+10	2,37	3,46E-03	0,87	7,44	4,27E+10	2,37	2,74E-04	0,63	1,02	1,61E+10
jul-10	2,40	4,11E-03	0,86	7,87	4,54E+10	2,40	1,89E-03	0,83	5,16	3,42E+10	2,40	2,19E-04	0,58	0,87	1,57E+10
ago-10	2,42	4,04E-03	0,79	7,42	4,42E+10	2,42	2,15E-03	0,76	5,15	3,47E+10	2,42	2,33E-04	0,54	0,72	1,53E+10
sep-10	2,42	4,86E-03	0,80	8,28	4,88E+10	2,42	2,40E-03	0,78	5,78	3,81E+10	2,42	2,60E-04	0,54	0,94	1,66E+10
oct-10	2,41	4,59E-03	0,97	8,35	5,07E+10	2,41	2,72E-03	0,94	6,67	4,33E+10	2,41	2,19E-04	0,67	0,93	1,73E+10
nov-10	2,40	5,25E-03	0,93	9,16	5,51E+10	2,40	3,17E-03	0,90	7,21	4,64E+10	2,40	2,87E-04	0,66	1,05	1,81E+10
dic-10	2,45	5,52E-03	1,00	10,41	6,23E+10	2,45	3,51E-03	0,97	7,53	4,93E+10	2,45	3,83E-04	0,83	1,12	1,98E+10
Total					6,17E+11					5,09E+11					1,95E+11

Tabla 50. Exergía específica y total compuestos añadidos y subproductos generados en “La Cartuja”.

Mes	C.Q. Añadido				Subproductos obtenidos línea de aguas							
	b_{Cl3Fe}	B_{Cl3Fe}	b_{poly}	B_{poly}	$b_{are,rec}$	$B_{are,rec}$	b_{grasas}	B_{grasas}	b_{fango2}	B_{fango2}	b_{fango1}	B_{fango1}
	[kJ/kg]	kJ	[kJ/kg]	kJ	[kJ/kg]	kJ	[kJ/kg]	kJ	[kJ/kg]	kJ	[kJ/kg]	kJ
ene-10	0,15	5,55E+08	0,041	1,48E+08	0,18	6,39E+08	9,87E-05	3,55E+05	4,19	1,51E+10	2,6	9,47E+09
feb-10	0,14	5,32E+08	0,044	1,62E+08	0,08	3,10E+08	8,72E-05	3,21E+05	3,49	1,29E+10	2,2	7,96E+09
mar-10	0,17	6,32E+08	0,054	2,04E+08	0,28	1,06E+09	9,45E-05	3,55E+05	4,74	1,78E+10	2,9	1,10E+10
abr-10	0,16	6,27E+08	0,051	1,96E+08	0,19	7,32E+08	8,95E-05	3,44E+05	4,83	1,86E+10	2,9	1,12E+10
may-10	0,15	5,95E+08	0,047	1,85E+08	0,19	7,45E+08	9,06E-05	3,55E+05	4,76	1,87E+10	2,9	1,13E+10
jun-10	0,15	5,94E+08	0,043	1,74E+08	0,19	7,72E+08	8,60E-05	3,44E+05	3,96	1,58E+10	2,3	9,11E+09
jul-10	0,11	4,47E+08	0,040	1,63E+08	0,20	8,31E+08	8,72E-05	3,55E+05	3,19	1,30E+10	1,7	6,96E+09
ago-10	0,10	4,17E+08	0,030	1,26E+08	0,14	5,69E+08	8,55E-05	3,55E+05	2,97	1,24E+10	1,5	6,44E+09
sep-10	0,11	4,50E+08	0,034	1,42E+08	0,25	1,05E+09	8,11E-05	3,44E+05	3,51	1,49E+10	1,9	8,26E+09
oct-10	0,10	4,54E+08	0,035	1,53E+08	0,15	6,43E+08	8,22E-05	3,55E+05	3,48	1,51E+10	2,0	8,59E+09
nov-10	0,11	4,94E+08	0,036	1,57E+08	0,17	7,53E+08	7,80E-05	3,44E+05	3,81	1,68E+10	2,2	9,71E+09
dic-10	0,14	6,17E+08	0,041	1,85E+08	0,18	7,96E+08	7,91E-05	3,55E+05	3,97	1,78E+10	2,3	1,02E+10
Total		6,42E+09		1,99E+09		8,90E+09		4,19E+06		1,89E+11		1,10E+11

Tabla 51. Exergía total flujos de gases, aire, calor y combustible en tratamiento y valorización de fangos "La Cartuja"

Mes	B_{fuel} kJ	B_{cond} kJ	Con caudales calculados			Con caudales dados por planta		
			B_{aire} kJ	$B_{gas,cal}$ kJ	$B_{gas,frio}$ kJ	B_{aire} kJ	$B_{gas,cal}$ kJ	$B_{gas,frio}$ kJ
			ene-10	1,65E+08	5,75E+08	2,50E+08	1,12E+10	2,82E+09
feb-10	1,78E+09	5,19E+08	2,29E+08	1,02E+10	2,59E+09	2,82E+08	1,20E+10	3,03E+09
mar-10	9,38E+07	5,75E+08	2,89E+08	1,28E+10	3,24E+09	3,56E+08	1,33E+10	3,36E+09
abr-10	1,14E+08	5,56E+08	2,96E+08	1,31E+10	3,31E+09	3,27E+08	1,28E+10	3,25E+09
may-10	9,84E+07	5,75E+08	3,05E+08	1,33E+10	3,37E+09	3,32E+08	1,33E+10	3,36E+09
jun-10	2,76E+07	5,56E+08	2,54E+08	1,12E+10	2,85E+09	4,32E+08	1,28E+10	3,25E+09
jul-10	1,40E+08	5,75E+08	2,10E+08	9,29E+09	2,35E+09	2,82E+08	1,33E+10	3,36E+09
ago-10	1,09E+07	5,75E+08	1,96E+08	8,57E+09	2,17E+09	2,72E+08	1,33E+10	3,36E+09
sep-10	1,11E+07	5,56E+08	2,35E+08	1,03E+10	2,61E+09	3,29E+08	1,28E+10	3,25E+09
oct-10	1,08E+07	5,75E+08	2,43E+08	1,07E+10	2,71E+09	3,60E+08	1,33E+10	3,36E+09
nov-10	1,62E+08	5,56E+08	2,80E+08	1,24E+10	3,14E+09	3,23E+08	1,28E+10	3,25E+09
dic-10	2,71E+08	5,75E+08	2,93E+08	1,31E+10	3,30E+09	3,61E+08	1,33E+10	3,36E+09

Tabla 52. Índices exergéticos en "La Cartuja"

Mes	Proceso global				
	k_{prod}	η_{prod}	k_{proc}	η_{proc}	$\eta_{elim,res}$
ene-10	3,974	0,252	3,237	0,309	0,443
feb-10	4,499	0,222	3,708	0,270	0,343
mar-10	4,053	0,247	3,256	0,307	0,493
abr-10	3,714	0,269	2,966	0,337	0,562
may-10	3,801	0,263	3,053	0,328	0,523
jun-10	3,702	0,270	3,056	0,327	0,449
jul-10	3,488	0,287	2,940	0,340	0,399
ago-10	3,423	0,292	2,904	0,344	0,385
sep-10	3,442	0,291	2,890	0,346	0,441
oct-10	3,428	0,292	2,881	0,347	0,426
nov-10	3,510	0,285	2,915	0,343	0,445
dic-10	3,586	0,279	2,998	0,334	0,422
Total	3,704	0,270	3,059	0,327	3,704

Tabla 53. Coste y eficiencia exergética en tratamiento primario y secundario de "La Cartuja"

Mes	Tratamiento primario				Tratamiento secundario			
	k_{prod}	η_{prod}	k_{proc}	η_{proc}	k_{prod}	η_{prod}	k_{proc}	η_{proc}
ene-10	1,256	0,796	1,026	0,975	3,087	0,324	1,536	0,651
feb-10	1,293	0,773	1,098	0,911	3,327	0,301	1,767	0,566
mar-10	1,238	0,808	0,997	1,003	3,191	0,313	1,489	0,672
abr-10	1,189	0,841	0,939	1,065	3,027	0,330	1,369	0,730
may-10	1,199	0,834	0,961	1,041	3,081	0,325	1,428	0,700
jun-10	1,245	0,803	1,026	0,975	2,904	0,344	1,465	0,683
jul-10	1,404	0,712	1,166	0,857	2,441	0,410	1,335	0,749
ago-10	1,344	0,744	1,134	0,882	2,500	0,400	1,384	0,722
sep-10	1,343	0,744	1,104	0,906	2,520	0,397	1,328	0,753
oct-10	1,228	0,815	1,024	0,976	2,725	0,367	1,456	0,687
nov-10	1,240	0,806	1,025	0,975	2,764	0,362	1,435	0,697
dic-10	1,312	0,762	1,087	0,920	2,684	0,373	1,410	0,709
Total	1,2701	0,7873	1,0439	0,9579	2,8441	0,3516	1,4467	0,6912

Tabla 54. Coste y eficiencia exergética etapa de tratamiento de fangos en "La Cartuja".

Mes	Tratamiento de fangos							
	Caudales calculados				Caudales aportados planta			
	k_{prod}	η_{prod}	k_{proc}	η_{proc}	k_{prod}	η_{prod}	k_{proc}	η_{proc}
ene-10	2,439	0,410	1,482	0,675	2,054	0,487	1,331	0,751
feb-10	2,445	0,409	1,468	0,681	2,089	0,479	1,333	0,750
mar-10	2,475	0,404	1,435	0,697	2,396	0,417	1,409	0,710
abr-10	2,495	0,401	1,592	0,628	2,547	0,393	1,613	0,620
may-10	2,463	0,406	1,653	0,605	2,478	0,404	1,660	0,602
jun-10	2,452	0,408	1,573	0,636	2,162	0,463	1,451	0,689
jul-10	2,452	0,408	1,728	0,579	1,722	0,581	1,332	0,751
ago-10	2,475	0,404	1,712	0,584	1,605	0,623	1,246	0,803
sep-10	2,479	0,403	1,642	0,609	1,997	0,501	1,418	0,705
oct-10	2,447	0,409	1,696	0,589	1,984	0,504	1,462	0,684
nov-10	2,348	0,426	1,775	0,563	2,275	0,440	1,734	0,577
dic-10	2,359	0,424	1,667	0,600	2,326	0,430	1,652	0,605
Total	2,442	0,409	1,608	0,622	2,135	0,468	1,470	0,680

Tabla 55. Coste y eficiencia exergética etapa valorización en "La Cartuja".

Mes	k_{prod}	η_{prod}	Sin calor condensador		Con calor condensador	
			k_{proc}	η_{proc}	k_{proc}	η_{proc}
ene-10	13,086	0,076	2,842	0,352	2,479	0,403
feb-10	10,047	0,100	2,667	0,375	2,349	0,426
mar-10	15,060	0,066	2,924	0,342	2,585	0,387
abr-10	9,927	0,101	2,657	0,376	2,387	0,419
may-10	9,651	0,104	2,635	0,379	2,367	0,423
jun-10	8,719	0,115	2,562	0,390	2,274	0,440
jul-10	9,081	0,110	2,592	0,386	2,234	0,448
ago-10	9,697	0,103	2,639	0,379	2,242	0,446
sep-10	8,547	0,117	2,546	0,393	2,238	0,447
oct-10	7,867	0,127	2,482	0,403	2,190	0,457
nov-10	9,597	0,104	2,633	0,380	2,355	0,425
dic-10	9,009	0,111	2,587	0,386	2,323	0,431
Total	9,780	0,102	2,646	0,378	2,339	0,428